

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**



## **ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ**

### **Завдання до самостійного розв'язання**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для  
підготовки бакалаврів, які навчаються  
за спеціальностями 133 – Галузеве машинобудування, 131 – Прикладна механіка*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Завдання самостійного розв'язання : навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за спеціальностями 133 – Галузеве машинобудування, 131 – Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак, – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 99 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 25.04.2019 р.) за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету (протокол № 4 від 22.04.2019 р.)*

**ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ**  
**Завдання до самостійного розв'язання**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Укладачі:               | <i>Сідоров Дмитро Едуардович.</i> , канд. техн. наук, доц.<br><i>Казак Ірина Олександрівна</i> , канд. пед. наук |
| Відповідальний редактор | <i>Шаблій Т.О.</i> , докт. техн. наук, проф.   |
| Рецензент:              | <i>Коржик М.В.</i> , канд. техн. наук, доц.  |

Посібник призначений для поглиблення знань з дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» шляхом самостійного опанування студентами деяких питань, набуття досвіду у програмуванні обчислювальних інженерних задач, їх аналізу та сприяє розвитку алгоритмічного мислення студентів.

Посібник містить завдання, згруповані у відповідності до матеріалу програми дисципліни по 40 і більше завдань, чого достатньо для організації освітнього процесу у потоці з двох академічних груп. Наприкінці посібника наведено перелік рекомендованих навчально-методичних матеріалів.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 4  |
| Завдання для самостійного розв'язання.....  | 5  |
| 1. Операції введення та виведення. Обчислення арифметичних виразів.....               | 5  |
| 2. Умовні оператори управління, оператор безумовного переходу.....                    | 23 |
| 3. Робота з електронними таблицями. Будування діаграм.....                            | 47 |
| 4. Циклічні обчислювальні процеси.....  | 53 |
| 5. Робота з інтегрованим середовищем розробки додатків.....                           | 75 |
| 6. Створення програм з використанням програмних одиниць.....                          | 79 |
| 7. Розв'язання диференціальних моделей на базі звичайних диференціальних рівнянь..... | 89 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....   | 93 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....                            | 94 |

## ВСТУП

Дисципліна «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» входить до циклу професійної підготовки (навчальна дисципліна професійної та практичної підготовки) навчального плану бакалаврів за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування» та 131 «Прикладна механіка». Зміст навчального посібника відповідає навчальній програмі з дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ».

Згідно до освітній програми, дисципліна «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» формує відповідну компетенцію, а саме здатність виконувати інженерні розрахунки на ПЕОМ з використанням алгоритмічної мови високого рівня (Фортран).

Дисципліна базується на знанні студентом, математики, інформатики, деяких законів фізики, хімії. Є базовою для вивчення наступних дисциплін: «Механіка твердого деформованого тіла», «Процеси і апарати хімічних виробництв», «Сучасні методи розрахунку процесів і апаратів», «Модернізація технологічного обладнання», курсового та дипломного проектування. Матеріал дисципліни викладається на 2-му курсі навчання студента.

Метою дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» є надання студентам певного комплексу знань, необхідних для вірного розуміння явищ природи, методів складання програмного коду і алгоритмізації інженерних розрахунків.

Згідно до освітньої програми, змістом уміння, що забезпечується, є наступне:

- користуючись алгоритмічною мовою високого рівня (ФОРТРАН) та відповідними компіляторами читати, аналізувати, редагувати вихідний програмний код, складати програми для інженерних розрахунків та реалізації математичних моделей початкового рівня на ПЕОМ, отримати з вихідного програмного коду об'єктний файл і файл, що виконується та результати його роботи;

- користуючись вимогами до оформлення інженерної документації складати блок-схеми програм для інженерних розрахунків, оформляти програмний код і результати розрахунків для звітування;

Дисципліна формує наступні знання:

- мови програмування високого рівня (Фортран), яка застосовується при виконанні інженерних розрахунків у галузі;
- правил та вимог щодо складання алгоритмів та оформлення інженерної розрахункової документації

Посібник призначений для поглиблення знань з дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» шляхом самостійного опанування студентами деяких питань, набуття досвіду у програмуванні обчислювальних інженерних задач, їх аналізу та сприяє розвитку алгоритмічного мислення студентів.

Посібник містить завдання, згруповані у відповідності до матеріалу програми дисципліни по 40 і більше завдань, чого достатньо для організації лабораторного практикуму та самостійної роботи студентів у потоці з двох академічних груп. Наприкінці посібника наведено перелік рекомендованих навчально-методичних матеріалів.

## **ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ**

### **1. Операції введення та виведення. Обчислення арифметичних виразів**

1.1. Визначити час, що необхідний для спорожнення бака. Діаметр бака  $D = 1$  м. Бак наповнено на висоту  $h = 2$  м. Отвір у днищі  $d = 3$  см. Коефіцієнт витрати  $\alpha = 0,61$ ;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $\pi = 3,1415$ . Формула для обчислення:

$$\tau = \frac{2f\sqrt{h}}{\alpha f_0 \sqrt{2g}},$$

де  $f = \pi \frac{D^2}{4}$  – площа перерізу ємності м<sup>2</sup>;  $f_0 = \pi \frac{d^2}{4}$  – площа отвору, м<sup>2</sup>.

1.2. Визначити значення критерію Рейнольдса  $Re$  в міжтрубному просторі теплообмінника типу “труба у трубі” та супутні величини, якщо труби мають натульні діаметри  $d_1 = 22$  мм,  $d_2 = 51$  мм, товщину стінки  $\delta_1 = 2$  мм,  $\delta_2 = 2,5$  мм; масова витрата рідини  $\nu = 1,730$  кг/с, динамічна в’язкість  $\mu = 1,2 \cdot 10^{-3}$  Па·с, густина  $\rho = 1150$  кг/м<sup>3</sup>. Формули для обчислення:

$$Re = \frac{\omega d_3}{\mu} \rho; d_3 = d_2^1 - d_1; \omega = \frac{\nu}{0.785 \rho [(d_2^1)^2 - d_1^2]}; d_2^1 = d_2 - 2\delta_2.$$

1.3. Повітря масою 1 кг при початкових параметрах: тиск  $P_1 = 1 \cdot 10^5$  Па, температура  $T_1 = 303$  К стискується за адіабатою до  $P_2 = 1 \cdot 10^6$  Па. Знайти кінцевий об’єм повітря при  $R = 292,7$  Дж/(кг·К),  $K = 1,4$ , використовуючи формулу:

$$V_2 = \frac{RT_1}{P_1} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/K}.$$

1.4. Визначити об’ємні витрати повітря за нормальних умов та супутні величини, якщо воно проходить по трубах теплообмінника (зовнішній діаметр  $d^1 = 20$  мм, товщина стінки  $\delta = 2$  мм число труб  $\eta = 100$ ), швидкість  $\omega = 9$  м/с при  $T = 333$  К, тиск  $P_{MAN} = 2 \cdot 10^5$  Па, барометричний тиск  $P_{BAR} = 1,68 \cdot 10^5$  Па,  $\rho_0 = 1.293$  кг/м<sup>3</sup>,  $T^0 = 273$  К. Формули для обчислення:

$$V_0 = \frac{M}{\rho_0}; M = \omega \eta 0.785 d^2 \rho; \rho = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0(T_0 - T)}; d = d^1 - 2\delta; P = P_{BAR} + P_{MAN}.$$

1.5. Знайти діаметр трубопроводу для транспортування водню при масових витратах  $V = 0,04$  кг/с та супутні величини. Довжина трубопроводу  $L = 1000$  м. Корисне падіння тиску  $\Delta P = 1080$  Па. Густина водню  $\rho = 0,0825$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,03$ . Формули для розрахунків:

$$d = c \sqrt{\frac{LW^2\rho}{\Delta P}}; \quad c = \sqrt[5]{\frac{\lambda}{2 \cdot 0.785^2}}; \quad W = \frac{V}{\rho}.$$

1.6. Визначити зміщення серединної лінії труби гідроциліндра з розмірами  $r_{\text{вн}} = 0,1$  м,  $r_{\text{зов}} = 0,25$  м та супутні величини, якщо діє навантаження тиском  $P_{\text{вн}} = 200$  МПа,  $P_{\text{зов}} = 80$  МПа. Гідроциліндр зроблений з сталі з коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ ; модулем пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $n = 2$ . Розрахункова формула:

$$U = \frac{1 - \mu}{E} \frac{r_{\text{вн}}^n P_{\text{вн}} - r_{\text{зов}}^n P_{\text{зов}}}{r_{\text{зов}}^n - r_{\text{вн}}^n} r_{\text{сеп}} + \frac{1 + \mu}{E} \frac{r_{\text{вн}}^n r_{\text{зов}}^n (P_{\text{зов}} - P_{\text{вн}})}{(r_{\text{зов}}^n - r_{\text{вн}}^n) r_{\text{сеп}}}, \quad \text{де } r_{\text{сеп}} = \frac{r_{\text{вн}} + r_{\text{зов}}}{2}.$$

1.7. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  та критерій Нусельта  $Nu$ , в цементній обертовій печі при температурі  $T_r = 1600$  °С, температурі футерівки  $T_\phi = 1100$  °С, коефіцієнті чорноти поверхні  $C_\epsilon = 1,18$ . Швидкість руху потоку  $\omega_r = 6$  м/с, теплопровідність  $\lambda_r = 0,048$  Вт/(м·°С), кінематична в'язкість  $\nu_r = 80,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Діаметр печі  $D_\Pi = 4,6$  м,  $m = 4$ . Розрахункові формули:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_r}{D_\Pi} + \frac{C_\epsilon \left[ \left( \frac{T_r + 273}{100} \right)^m - \left( \frac{T_\phi + 273}{100} \right)^m \right]}{(T_r - T_\phi)}; \quad Nu = 0.418 \left( \frac{\omega_r D_\Pi}{\nu_r} \right)^{0.67}.$$

1.8. Визначити напруження  $P$  від гарячої посадки, що виникає на стику двох складених труб. Величина натягу  $\delta = 12 \cdot 10^{-5}$  м, радіуси першої труби  $r_a$  дорівнює 0,1 м, радіус контакту труб  $r_c = 0,3$  м, пружний радіус другої труби  $r_b$  дорівнює 0,4 м. Труби виконані з однакової сировини з модулем пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $k = 3$ ,  $n = 2$ . Розрахункова формула:

$$P = \frac{\delta E}{2r_b^k} \frac{(r_c^n - r_b^n)(r_b^n - r_a^n)}{r_c^n - r_a^n}.$$

1.9. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари (м/с) при початковому тиску  $P_1 = 1 \cdot 10^6$  Па, питомий об'єм  $V_1 = 0,263$  м<sup>3</sup>/кг, показник політропи  $k = 1,135$  та  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Розрахункова формула:

$$W_{kp} = \sqrt{kg \frac{2}{k+1} P_1 V_1}.$$

1.10. Знайти жорсткість  $D$  та максимальний прогин  $W_{\max}$  пластинки радіуса  $r = 0,2$  м, товщиною  $h = 0,03$  м, що жорстко закріплена по контуру та піддана дії рівномірно розподіленого навантаження  $q = 0,3$  МПа при модулі пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа. Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$  та  $n = 4$ . Розрахункова формула:

$$W_{\max} = \frac{qr^n}{64D}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)}.$$

1.11. Визначити максимальні витрати пари через сопло за умов: площа перетину сопла  $f = 1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>, питомий об'єм  $V_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>/кг, початковий пари тиск  $P_1 = 1 \cdot 10^6$  Па, показники політропи  $\kappa = 1,135$ ,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Розрахункова формула:



$$G_{\max} = 1,99 f \sqrt{\left(kg \frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{P_1}{V_1}}.$$

1.12. Визначити максимальні напруження в круглій жорстко закріпленій по контуру пластини радіуса  $r = 0,35$  м, товщиною  $h = 0,05$  м, під дією рівномірного навантаження  $q = 5,8$  МПа. Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ ;  $n = 2$ . Розрахункова формула:

$$(\sigma_r)_{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qd^n}{h^n}; (\sigma_\tau)_{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qd^n}{h^n}; d=2r.$$

1.13. Визначити максимальні витрати газу через сопло що звужується, якщо початкові параметри газу  $P_0 = 6,4 \cdot 10^6$  Па,  $V_0 = 0,0139$  м<sup>3</sup>/м,  $k = 1,4$ . Площа отвору сопла  $f = 5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Розрахункова формула:

$$G = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_0}{V_0}}.$$

1.14. Визначити переміщення  $U$  зовнішньої поверхні диска зовнішнього радіусу  $b = 0,15$  м і внутрішнього радіусу  $a = 0,05$  м, що виникають під дією відцентрових сил. Швидкість обертання диску  $\omega = 157$  рад/с,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $\gamma = 7,65 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>,  $n = 2$ ,  $\mu = 0,3$ . Розрахункові формули:

$$N = (1 - \mu^n) \frac{\gamma \omega^n}{gE}; \quad U = \frac{Nb}{8} \left[ \frac{3 + \mu}{1 + \mu} (a^n + b^n) + \frac{31\mu}{1 - \mu} (a^n - b^n) \right].$$

1.15. Знайти коефіцієнт теплопередачі  $k$  і витрати теплоти  $q$  з одного метра квадратного поверхні стінки з вогнетривкої (товщина  $\delta_1 = 0,5$  м, теплопровідність  $\lambda_1 = 1,16$  Вт/(м К)) та будівельної цегли ( $\delta_2 = 0,25$  м,

$\lambda_2 = 0,5 \text{ Вт/(мК)}$ ). Температура та коефіцієнт тепловіддачі в печі, відповідно,  $t_r = 1500 \text{ С}$ ,  $\alpha_1 = 34,8 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ , зовні  $t_0 = 25 \text{ С}$ ,  $\alpha_2 = 16,2 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ . Розрахункові формули:

$$q = k(t_r - t_0); \quad k = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}.$$

1.16. Визначити коефіцієнт теплопередачі і температуру на межі між вогнетривкою та будівельною цеглою, за умовами задачі 15. Розрахункові формули:

$$T_k = T_r - k(T_r - T_0) \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} \right); \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

1.17. Визначити максимальні напруження у круглій, закріпленій по контуру пластині діаметром  $D = 0,8 \text{ м}$  і товщиною  $\delta = 0,05 \text{ м}$ , яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження  $q = 4,12 \text{ МПа}$ . Коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини  $\mu = 0,3$ , показник  $n = 2$ . Формули для розрахунків:

$$\sigma_r^{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qD^n}{\delta^n}, \quad \sigma_\tau^{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qD^n}{\delta^n}.$$

1.18. Визначити площу перетину  $S$  отвору та максимальну витрату  $G$  продуктів горіння, що витікають через конфузорне сопло, якщо початкові параметри продуктів горіння такі:  $P_0 = 4,2 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ ;  $V_0 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $k = 1,4$ ; діаметр сопла  $d = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Формули для розрахунків:

$$G = S \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left( \frac{P_0}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

1.19. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари при початковому тиску  $P_n = 1,3 \cdot 10^6$  Па, питомому об'ємі  $V_{num} = 0,32$  м<sup>3</sup>/кг, показнику політропи  $k = 1,135$  і  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> за формулою:

$$V_{кр.} = \left( kg \frac{2}{k+1} P_n V_{num} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

1.20. Визначити прогин  $U$  (та супутні величини) круглої пластини діаметром  $D = 0,5$  м і товщиною  $\delta = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м при жорсткому закріпленні контуру і діючому тиску  $P = 0,28$  МПа. Модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ ;  $n = 4$ . Формули для розрахунку:

$$U = \frac{P \cdot r^n}{64\gamma}, \quad \gamma = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\mu)}, \quad r = \frac{D}{2}.$$

1.21. Визначити площу перетину соплу  $S$  та витрати пари  $G$ , що витікає з соплу діаметром  $D = 1,1 \cdot 10^{-2}$  м парової камери. Відносний об'єм парової камери  $V = 0,48$  м<sup>3</sup>/кг, тиск  $P = 1,3 \cdot 10^6$  Па, показник політропи  $k = 1,112$ ,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Формули для розрахунку:

$$G = 1,99 \cdot S \left( kg \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{P}{V}}, \quad S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

1.22. Диск, який швидко обертається, має внутрішній радіус  $r_1 = 0,052$  м і зовнішній радіус  $r_2 = 0,136$  м. Диск знаходиться під дією відцентрових сил. Визначити величину діючої сили  $N$  та переміщення  $U$  зовнішньої поверхні

диска, якщо швидкість обертання  $\omega = 138$  рад/с;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $g = 9,8$  м/с;  
 $\gamma = 7,7 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>;  $n = 2$ ;  $\mu = 0,3$ . Формули для розрахунку:

$$U = \frac{Nr_2}{8} \left[ \frac{3+\mu}{1+\mu} (r_1^h + r_2^h) + \frac{3+\mu}{1-\mu} (r_1^h - r_2^h) \right], \quad N = (1 - \mu^h) \frac{\gamma \omega^h}{gE}.$$

1.23. Визначити витрати теплоти  $Q$  (Вт) шляхом випромінювання (та супутні величини) квадратним цегляним каналом зі стороною  $d = 0,5$  м, довжиною каналу  $\ell = 15$  м, з температурою внутрішньої поверхні стінки  $t_1 = 250$  °С і зовнішньої  $t_2 = 30$  °С, якщо  $\pi = 3,14$  та  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>). Ступінь чорноти цегли  $E_1 = 0,93$ . Формули для обчислення:

$$Q = E_1 C_0 F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad T_1 = t_1 + 273, \quad T_2 = t_2 + 273.$$

1.24. З циліндричної ємності діаметром  $D = 2$  м розчин соляної кислоти подається в редуктор. Визначити площі  $S$ ,  $s$  та час  $\tau$ , при якому уся рідина із ємності, що наповнена до висоти  $H = 2,7$  встигає потрапити в редуктор. Мінімальний діаметр прохідного перерізу отвору  $d = 25$  мм. Коефіцієнт витрати  $\alpha = 0,68$ ;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Користуватися формулами:

$$\tau = \frac{2S\sqrt{H}}{\alpha s\sqrt{2g}}, \quad S = \pi \frac{D^2}{4}, \quad s = \pi \frac{d^2}{4}.$$

1.25. Розчин тече у теплообмінному каналі кільцевого перерізу. Діаметр каналу:  $D = 70$  мм,  $d = 26$  мм. Визначити значення критерію Рейнольдса  $Re$  в каналі та супутні величини, якщо масова витрата розчину  $G = 1,85$  кг/с; його

густина  $\rho = 1160 \text{ кг/м}^3$ ; динамічна в'язкість  $\mu = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Формули для розрахунку:

$$\text{Re} = \frac{VD_{\text{екв.}}\rho}{\mu}, \quad D_{\text{екв.}} = D - d, \quad V = \frac{G}{0,785(D^2 - d^2)\rho}.$$

1.26. Визначити значення критерію Нусельта  $Nu$  і коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  для печі обпалювання клінкера діаметром  $D = 4,2 \text{ м}$ , при температурі газу в печі  $t_{\text{газу}} = 1500^\circ\text{C}$ . Температура в середині печі  $t_{\text{нов}} = 1120^\circ\text{C}$ . Швидкість руху газу  $V = 8 \text{ м/с}$ , теплопровідність газу  $\lambda = 0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ , кінематична в'язкість газу  $\nu = 81,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{D} + \frac{c \left[ \left( \frac{t_{\text{газу}} + 273}{100} \right)^m - \left( \frac{t_{\text{нов}} + 273}{100} \right)^m \right]}{(t_{\text{газу}} - t_{\text{нов}})}, \quad Nu = 0,418 \left( \frac{VD}{\nu} \right)^k.$$

Безрозмірні величини:  $m = 4$ ;  $k = 0,67$ ;  $c = 1,17$ .

1.27. Визначити напруження  $\sigma$ , які виникають від посадки з натягом у двошарової трубі, якщо натяг складає  $\delta = 12,82 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , а діаметри шарів, відповідно,  $D_1 = 0,2 \text{ м}$ ;  $D_2 = 0,6 \text{ м}$ ;  $D_3 = 0,8 \text{ м}$ . Труби виготовлені з матеріалу що має наступні характеристики:  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $k = 3$ ,  $n = 2$ . Формули для розрахунку:

$$\sigma = \frac{\delta E}{2r_1^k} \frac{(r_3^n - r_2^n)(r_2^n - r_1^n)}{r_3^n - r_1^n}, \quad r_1 = \frac{D_1}{2}, \quad r_2 = \frac{D_2}{2}, \quad r_3 = \frac{D_3}{2}.$$

1.28. Визначити величину питомого теплового потоку  $q$  через стінку печі обігріву, що виконана з вогнестійкої цегли товщиною  $\delta_1 = 0,3 \text{ м}$  і теплопровідністю  $\lambda_1 = 1,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Піч укріплена будівельною цеглою товщиною  $\delta_2 = 0,125 \text{ м}$  і теплопровідністю  $\lambda_2 = 0,59 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Температура і

коефіцієнт тепловіддачі всередині  $t_b = 1490^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_b = 33,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , ззовні –  $t_c = 28^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_c = 14,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Формули для розрахунку:

$$q = K(T_b - T_c), \quad K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$

1.29. Визначити максимальне зусилля у круглій, закріпленій по контуру пластині що має діаметр  $D = 0,8 \text{ м}$  і товщину  $\delta = 0,05 \text{ м}$ , яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження  $q = 4,12 \text{ МПа}$ . Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ ;  $n = 2$ . Формули для розрахунку:

$$\sigma_r^{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qD^n}{\delta^n}, \quad \sigma_\tau^{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qD^n}{\delta^n}.$$

1.30. Визначити максимальну витрату  $G$  продуктів горіння, що витікають крізь конфузorne сопло, якщо початкові параметри продуктів горіння такі:  $P_0 = 7,2 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ ;  $V_0 = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\kappa = 1,39$ ; діаметр сопла  $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Формули для розрахунку:

$$G = S \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left( \frac{P_0}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

1.31. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари при початковому тиску  $P_n = 1,113 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , питомому об'ємі  $V_{num} = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  показнику політропи  $k = 1,129$  і  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  за формулою:

$$V_{кр.} = \left( kg \frac{2}{k+1} P_n V_{num} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

1.32. Визначити прогин  $U$  (і супутні величини) круглої пластини діаметром  $D = 0,5\text{м}$  і товщиною  $\delta = 2,8 \cdot 10^{-2}\text{м}$  при жорсткому закріпленні контуру і діючому тиску  $P = 0,28\text{ МПа}$ . Модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5\text{ МПа}$ . Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ ;  $n = 4$ . Формули:

$$U = \frac{P \cdot r^n}{64\gamma}, \quad \gamma = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu)}, \quad r = \frac{D}{2}.$$

1.33. Визначити витрати пари  $G$  що витікає з соплу діаметром  $D = 1,1 \cdot 10^{-2}\text{м}$  парової камери, відносним об'ємом  $V = 0,48\text{ м}^3/\text{кг}$ . Тиск  $P = 1,3 \cdot 10^6\text{ Па}$ , показник політропи  $k = 1,112$ ,  $g = 9,81\text{м/с}^2$ . Формула для розрахунку:

$$G = 1,99 \frac{\pi D^2}{4} \left( kg \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{P}{V}}.$$

1.34. Визначити витрати теплоти  $Q$  ( $\text{Вт/м}^2$ ) шляхом випромінювання залізною трубою діаметром  $d = 0,1\text{ м}$ , довжиною  $\ell = 10\text{ м}$ , якщо внутрішня температура поверхні стінки  $t_1 = 275\text{ }^\circ\text{C}$  і зовнішня  $t_2 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , а також відомі сталі  $\pi = 3,14$  та  $C_0 = 5,67\text{ Вт/}(\text{м}^2\text{ К}^4)$ , ступінь чорноти заліза  $E = 0,35$ . Формули для обчислення:

$$Q = q \cdot F, \quad F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad T_1 = t_1 + 273, \quad T_2 = t_2 + 273,$$

$$q = EC_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

1.35. Стінка топочної камери парового котла виготовлена із шару піношамоту товщиною  $\delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}\text{м}$  та шару червоної цегли товщиною  $\delta_2 = 4,5 \cdot 10^{-2}\text{м}$ . Температура внутрішньої поверхні камери  $t_1 = 1000\text{ }^\circ\text{C}$  і зовнішньої  $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт теплопровідності цегли  $\lambda_2 = 0,28\text{ Вт/}(\text{м}\cdot\text{К})$ . Знайти питомі витрати теплоти топочної камери  $q$ ,  $\text{Вт/м}^2$ . Формули для обчислення:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R_1 + R_2}, \quad R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \quad \lambda_1 = 0,28 + 0,0023 \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

1.36. Визначити питомий тепловий потік  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, через циліндричну залізну одношарову стінку, якщо внутрішній і зовнішній діаметри стінки, відповідно,  $d_1 = 20$  мм і  $d_2 = 24$  мм, коефіцієнт теплопровідності заліза складає  $\lambda = 30$  Вт/(м·К), температура на внутрішній і зовнішній поверхні стінки, відповідно,  $t_1 = 180$  °С і  $t_2 = 27$  °С;  $\pi = 3,14$ . Формули для обчислення:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R}, \quad R = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

1.37. Визначити інтенсивність тепловіддачі  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) при кипінні рідини в котлі, якщо коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,8$  Вт/(м·К), визначальний розмір  $d_0 = 0,04$  м, критерій теплового навантаження  $K = 5,1$ , критерій Прандтля  $Pr = 1,1$ . Формули для обчислення:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_0}; \quad Nu = 54 \cdot K^{0,6} \cdot Pr^{-0,3}.$$

1.38. Визначити дійсну швидкість течії кисню  $C_{2д} = \varphi \cdot C_2$  (м/с) з сопла, якщо тиск і температура на вході у сопло  $P_0 = 12 \cdot 10^5$  Па і  $t_0 = 227$  °С. Тиск на виході з сопла дорівнює атмосферному тиску  $P_2 = 0,95 \cdot 10^5$  Па. Показник швидкості потоку  $\varphi = 0,95$ . Показник адіабати повітря  $k = 1,4$ . Розрахункові формули:

$$C_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_0 \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}; \quad T = t_0 + 273, \quad K;$$



Універсальна газова стала кисню  $R = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

1.39. Маса газу азоту  $m = 5 \text{ кг}$  політропічне розширюється від  $P_1 = 8 \cdot 10^3 \text{ Па}$  і  $v_1 = 0,127 \text{ м}^3$  до  $P_2 = 0,9 \cdot 10^3 \text{ Па}$  і  $v_2 = 0,8 \text{ м}^3$ . Визначити теплоємність політропного процесу  $C_n$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  і роботу  $L$ ,  $\text{кДж}$ , якщо показник політропи  $n = 1,15$ , а показник адіабати повітря  $K = 1,4$ .

Формули для розрахунку:

$$C_n = C_v \frac{n-K}{n-1}; \quad L = m \cdot \left( \frac{P_1 v_1 - P_2 v_2}{n-1} \right).$$

Ізохорна теплоємність азоту  $C_v = 0,746 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

1.40. По трубопроводу протікає кисень з об'ємною витратою  $V_\tau = 10 \text{ м}^3/\text{с}$  при температурі  $t = 127^\circ\text{C}$  ( $T = t + 273 \text{ К}$ ) і тиску  $P = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Визначити масову витрату кисню  $m_\tau$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ , і діаметр трубопроводу  $d$ ,  $\text{м}$ , якщо швидкість течії газу в трубопроводі  $\omega = 15 \text{ м}/\text{с}$ . Молярна маса кисню  $\mu = 32 \text{ кг}/\text{кмоль}$ , універсальна газова стала кисню  $R = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $\pi = 3,14$ . Формула для розрахунку:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V_\tau}{\pi \cdot \omega}}; \quad m_\tau = \frac{P \cdot V_\tau}{R \cdot T}.$$

1.41. Визначити густину  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , газу при абсолютному тиску  $P = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}$  і температурі  $t = 15^\circ\text{C}$  ( $T = t + 273 \text{ К}$ ). Універсальна газова стала ідеального газу  $R_\mu = 8314 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $\mu = 1,2$ . Формули для розрахунку:

$$R_{co} = \frac{R_\mu}{\mu}, \quad \rho = \frac{P}{R_{co} \cdot T}.$$

1.42. У закритому посуді з об'ємом  $v_1 = 0,8 \text{ м}^3$  знаходиться оксид вуглецю  $\text{CO}$  під тиском  $P_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Па}$  і температурі  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . До газу підводиться

кількість теплоти  $Q_v = 4600$  кДж. Визначити температуру  $t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , і тиск  $P_2$ , МПа, оксиду вуглецю у кінці процесу, якщо теплоємність газу  $C_v = 0,742$  кДж/(кг·К), універсальна газова стала оксиду вуглецю  $R = 296,9$  Дж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$t_2 = \frac{Q_v}{m \cdot C_v} + t_1, \quad m = \frac{P_1 \cdot v_1}{R \cdot T_1}, \quad P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1},$$

$$T_1 = t_1 + 273, \quad T_2 = t_2 + 273.$$

1.43. Швидкість кисню в апараті  $v_1 = 3$  м/с, тиск  $P_1 = 1,2 \cdot 10^6$  Па і температура  $t_1 = 20$   $^{\circ}\text{C}$ . Визначити масу кисню  $m$ , кг, та кількість теплоти  $Q_v$ , кДж, яка підводиться до кисню, якщо температура у кінці процесу підвода теплоти складає  $t_2 = 320$   $^{\circ}\text{C}$ , теплоємність газу  $C_v = 0,746$  кДж/(кг·К), а універсальна газова стала  $R = 259,8$  Дж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$Q_v = m \cdot C_v \cdot (t_2 - t_1); \quad m = \frac{P_1 \cdot v_1}{R \cdot T_1}; \quad T_1 = t_1 + 273, \text{ К.}$$

1.44. Відливка з хрому  $T_1 = 20$   $^{\circ}\text{C}$  нагрівається в муфельній електричній печі з температурою стінок з цегли  $T_2 = 1200$   $^{\circ}\text{C}$ . Середня за період нагрівання ступінь чорноти відливки  $E_1 = 0,26$ , а стінки –  $E_2 = 0,9$ . Визначити питомий тепловий потік теплоти випромінювання в залежності від температури відливки в процесі нагрівання  $q$ , кДж/кг, якщо  $C_0 = 5,67$  Вт/(м $^2$ ·К), площа поверхні відливки  $F_1 = 24$  м $^2$ , площа поверхні стінок печі  $F_2 = 120$  м $^2$ . Формули для розрахунку:

$$q = E_{36} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad E_{36} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left( \frac{1}{E_2} - 1 \right)}.$$

1.45. Визначити довжину трубок  $L$ , м, з яких складається 8-ми рядний калорифер ( $N_1 = 8$ ), якщо кількість труб у одному ряді  $N_2 = 5$ , зовнішній діаметр трубок  $d = 4,2 \cdot 10^{-2}$  м, температура зовнішньої поверхні труб  $t_{cm} = 138$  °С, визначальна температура повітря  $t_0 = 40$  °С, потужність теплового потоку калорифера  $Q = 112 \cdot 10^3$  Вт,  $\pi = 3,14$ , коефіцієнт тепловіддачі першого ряду труб  $a_1 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>К), другого ряду –  $a_2 = 75$  Вт/(м<sup>2</sup>К), третього ряду труб –  $a_3 = 85$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Формули для обчислення:

$$L = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot \alpha_{cep} \cdot (t_{cm} - t_0) \cdot N_1 \cdot N_2}, \quad \alpha_{cep} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + (N_1 - 2)\alpha_3}{N_1}$$

1.46. Розрахувати критерій Нусельта  $Nu_p$  для трансформаторного масла у квадратному каналі площею  $f = 3,35 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> і змоченим периметром каналу  $\Pi = 2,32 \cdot 10^{-2}$  м, якщо швидкість масла  $v = 0,8$  м/с, кінематична в'язкість масла  $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, критерій Грасгофа  $Gr = 335$ , критерій Прандтля для рідини (масло)  $Pr_p = 202$ , критерій Прандтля стінки  $Pr_{cm} = 0,69$ . Формули для розрахунку:

$$Nu_p = 0,17 \cdot Re_p^{0,33} \cdot Gr^{0,1} \cdot Pr_p^{0,43} \left( \frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}; \quad Re_p = \frac{v \cdot d_{екв}}{\nu}; \quad d_{екв} = \frac{4 \cdot f}{\Pi}.$$

1.47. Визначити коефіцієнт тепловіддачі до повітря  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>К) та потужність теплового потоку  $Q$ , Вт, секції горизонтально розташованої батареї опалення діаметром  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м та довжиною  $H = 0,6$  м, якщо температура стінки  $t_{cm} = 115$  °С, а температура повітря  $t_{cep} = 25$  °С, стала  $\pi = 3,14$ , коефіцієнт теплопровідності повітря  $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), критерій Нусельта  $Nu = 35$ . Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad Q = \alpha \cdot (t_{cm} - t_{cep}) \cdot \pi \cdot d \cdot H.$$

1.48. Визначити коефіцієнт теплопровідності рідини  $\lambda_p$ , Вт/(м·К), якщо потужність теплового потоку через шар рідини  $Q = 16$  Вт, температура платинової нитки  $t_1 = 110$  °С та температура зовнішньої поверхні кварцової трубки  $t_2 = 32$  °С. Стала  $\pi = 3,14$ , внутрішній і зовнішній діаметри  $d_2 = 1 \cdot 10^{-3}$  м і  $d_3 = 3 \cdot 10^{-3}$  м, діаметр  $d_1 = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м, довжина платинової нитки  $L = 7,2 \cdot 10^{-2}$  м, коефіцієнт теплопровідності кварцу  $\lambda_2 = 3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К). Формули для розрахунку:

$$\lambda_p = \frac{q_\ell \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{\left( t_1 - t_2 - q_\ell \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} \right) \cdot 2 \cdot \pi}, \quad q_\ell = \frac{Q}{\ell}.$$

1.49. Визначити втрати теплоти  $Q$ , Вт, крізь двошарову кульову стінку, виготовлену з латуні та вкриту шаром ізоляції з скловати. Внутрішній діаметр шару з латуні  $d_1 = 2$  м, товщина якого  $\sigma_1 = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м, а товщина ізоляції складає  $\sigma_2 = 0,15$  м. Температура внутрішньої поверхні стінки  $t_1 = 165$  °С, а зовнішньої –  $t_2 = 40$  °С, коефіцієнт теплопровідності латуні та коефіцієнт теплопровідності скловати  $\lambda_1 = 100$  Вт/(м·К) і  $\lambda_2 = 5,1 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К). Стала  $\pi = 3,14$ . Формули для розрахунку:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right)}, \quad d_2 = d_1 + 2 \cdot \sigma_1, \quad d_3 = d_2 + 2 \cdot \sigma_2.$$

1.50. Визначити коефіцієнт тепловіддачі до повітря  $\alpha$ , Вт/(м²·К), та потужність теплового потоку  $Q$ , Вт, секції вертикально розташованої батареї опалення діаметром  $d = 5 \cdot 10^{-2}$  м та довжиною  $H = 0,8$  м, якщо температура стінки  $t_{cm} = 110$  °С, а температура повітря  $t_{cep} = 20$  °С, стала  $\pi = 3,14$ , коефіцієнт

теплопровідності повітря  $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), критерій Нусельта  $Nu = 45$ .  
Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{H}, \quad Q = \alpha \cdot (t_{cm} - t_{сер}) \cdot \pi \cdot d \cdot H.$$

1.51. Визначити температуру  $T_2$  (у градусах кельвіна) повітря на виході з компресору, і на виході з газової турбіни  $T_4$ , для газотурбінної установки, якщо відомі параметри повітря на вході у компресор: тиск  $P_1 = 1 \cdot 10^5$  Па і температура  $t_1 = 20$  °С, температура газів на вході в газову турбіну  $t_3 = 800$  °С, ступінь стискання повітря у компресорі  $s = 8$ , а показник адіабати повітря  $K = 1,4$ .  
Формули для розрахунку:

$$T_2 = T_1 \cdot \pi^{\frac{K-1}{K}}; \quad T_4 = T_3 \cdot \frac{T_1}{T_2}; \quad T_1 = t_1 + 273; \quad T_3 = t_3 + 273.$$

1.52. Визначити термічний ККД  $\eta$  газотурбінної установки, якщо відомі такі параметри: температура повітря на вході у компресор  $t_1 = 15$  °С, дійсна температура повітря за компресором  $t_5 = 178$  °С, температура газів на вході в газову турбіну  $t_{33} = 780$  °С. Формули для розрахунку:

$$\eta = \frac{(T_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{(t_{33} - t_6)}; \quad t_6 = T_6 - 273; \quad T_3 = t_{33} + 273; \quad T_1 = t_1 + 273; \quad T_6 = \frac{T_3 - T_1}{T_5}.$$

1.53. 1 кг азоту у початковому стані має тиск  $P_1 = 2,44 \cdot 10^6$  Па і температуру  $t_1 = 710$  °С. Після політропного розширення його тиск дорівнює  $P_2 = 1,1 \cdot 10^5$  Па. Визначити роботу розширення газу  $\ell$ , кДж/кг, якщо показник політропи  $n$  дорівнює 1,175, газова стала азоту  $R = 0,297$  кДж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$\ell = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2); \quad T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}; \quad T_1 = t_1 + 273, \text{ К}$$

1.54. Визначити теоретичну і дійсну температури повітря на виході з компресору  $t_2$ , °С і  $T_5$ , К, газотурбінної установки, якщо відомі такі параметри:  $P_1 = 1,12 \cdot 10^5$  Па,  $t_1 = 21$  °С,  $P_2 = 4,4 \cdot 10^5$  Па, внутрішній відносний ККД компресору  $\eta_{0s} = 0,84$ , показник адіабати повітря  $K = 1,4$ . Формули для розрахунку:

$$T_5 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad t_2 = \frac{t_5 - t_1}{\eta_{0s}} + t_1.$$

1.55. У холодильній машині до компресору потрапляє повітря з температурою  $t_1 = -8$  °С і тиском  $P_1 = 0,95 \cdot 10^5$  Па. Повітря стискається до тиску  $P_2 = 4 \cdot 10^5$  Па. Визначити температуру повітря  $T_2$ , К, після стискання у компресорі та холодильний коефіцієнт  $\varepsilon$ . Показник адіабати повітря  $K = 1,4$ . Формули для розрахунку:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}; \quad T_1 = t_1 + 273; \quad \varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1}.$$

1.56. Розрахувати еквівалентно-ефективну температуру  $t_e$  за формулою Міссендара:

$$t_e = 37 - 0,29t \left( 1 - \frac{f}{100} \right) - \frac{37 - t}{0,68 - 0,0014f + \frac{1}{1,76 + 1,4v^{3/4}}}.$$

Вихідні дані: швидкість вітру  $v = 2,1$  м/с; прийняти відносну вологість повітря  $f = 72$  %; температуру повітря  $t = 21$  °С.

## 2. Умовні оператори управління, оператор безумовного переходу

2.1. Відомі фізичні константи рідини, яка протікає по трубопроводу:

$\lambda = 0,103$  Вт/(м·К);  $Cp = 2,04 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $\mu_c = 0,198 \cdot 10^3$  Па·с;

$\mu_{жс} = 29,7$  Па·с;  $Re = 1500$ ; геометричні розміри:  $l = 1,1$  м;  $d = 0,072$  м.

Визначити коефіцієнт опору тертю  $\varepsilon$  при в'язкій течії рідини за формулами:

$$n = C \left( Pe \frac{l}{d} \right)^m \left( \frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,9};$$

$$\varepsilon = \varepsilon_K \left( \frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^n; \quad \varepsilon_K = \frac{64}{Re}; \quad \pi = 3,1415; \quad Pe \frac{l}{d} = \frac{4G}{\pi l} \frac{Cp}{\lambda};$$

$$\begin{cases} C = 2,31; m = -0,3, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} \leq 1500; \\ C = 0,535; m = -0,1, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} > 1500. \end{cases}$$

Прийняти:  $G = 2,3 \cdot 10^{-5}$ .

2.2. Мідний дріт діаметром  $d = 0,02$  м підвішений в потоці повітря, швидкість якого  $v$ . Фізичні властивості повітря:  $\nu_T = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ;

теплопровідність  $\lambda_T = 2,6 \times 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot К}$ . Прийняти  $\nu = 1,2 \frac{м}{с}$ . Визначити коефіцієнт

тепловіддачі  $\alpha$  поверхні проводу до повітря та супутні величини за формулами:

$$\alpha = Nu_T \frac{\lambda_T}{d}; \quad Re = \frac{v d}{\nu_T};$$

$$Nu_T = \begin{cases} 0,44 Re^{0,5}, & 10 \leq Re \leq 1 \times 10^3; \\ 0,22 Re^{0,6}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \times 10^5. \end{cases}$$

2.3. Трубка діаметром  $d = 12$  мм, охолоджується водою, параметри якої наступні:  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ;  $\lambda = 0,572 \frac{Вт}{м \cdot K}$ ;  $Pr = 9,4$ ;  $Pr_c = 3,6$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  поверхні трубки та супутні величини за формулами:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{Ud}{\nu}; \quad Nu = \begin{cases} 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq Re \leq 1 \times 10^3; \\ 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \times 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку води  $U = 0,85$  м/с.

2.4. Визначити величину теплового потоку  $q$  від калорифера діаметром  $d = 0,012$  м до повітря, якщо калорифер має температуру  $t_c = 70$  °С. Повітря має середню температуру  $t_n = 22$  °С, рухається зі швидкістю  $V = 2,2 \frac{м}{с}$  та характеризується наступними теплофізичними величинами:

$$\nu_m = 15,061 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}, \quad \lambda_m = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot K}.$$

Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d l; \quad \alpha = Nu_m \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon; \quad Nu_m = 0,22 Re^{0,6}; \quad Re = \frac{Vd}{\nu_m}.$$

$$\text{Прийняти } \varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^\circ; \\ 0,93, & \varphi = 60^\circ; \\ 0,66, & 60^\circ > \varphi \geq 30^\circ. \end{cases}$$

Передбачити, що кут атаки  $\varphi$  потоку повітря обирає користувач.



2.5. Визначити температуру  $T$  на глибині  $L$  стінки сушильної камери виготовленої з червоної цегли товщиною  $\delta_1 = 0,25$  м, теплопровідністю  $\lambda_1 = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ , що покрита ззовні термопокриттям товщиною  $\delta_2$  (значення вивести на друк), теплопровідність  $\lambda_2 = 0,047 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Питомі втрати теплоти крізь стінку складають  $q = 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура стінок камери: внутрішньої –  $T_B = 100$  °С, зовнішньої –  $T_3 = 25$  °С. Формули:

$$\delta_2 = \lambda_2 \frac{T_B - T_3}{q}; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,21$  м.

2.6. Визначити величину питомого теплового потоку  $\Phi$  з поверхні циліндричної секції батареї в оточуюче середовище, якщо фізичні коефіцієнти:

$$\nu_m = 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad \lambda_m = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}; \quad \beta = \frac{1}{273 + t_m}; \quad Pr = 0,7; \quad g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Формули:

$$\Phi = \alpha(t_c - t_m) \pi d; \quad Nu = C(GrPr)^n; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d}; \quad GrPr = \frac{g d^3 \beta (t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\begin{cases} C = 0,75, \quad n = 0,25, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1 \cdot 10^9; \\ C = 0,15, \quad n = 0,33, & (GrPr) > 6 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

Прийняти:  $t_c = 220$  °С;  $t_m = 35$  °С – температура, відповідно, батареї та навколишнього середовища;  $d = 0,36$  м – діаметр циліндричної секції.

2.7. З резервуара, тиск та температура в якому стали величини ( $P_0 = 6,3$  МПа;  $T_0 = 370$  К), через конфузorne сопло, в апарат подається кисень, де

тиск падає до  $P_{cp}$ . Показник адіабати кисню  $k = 1,42$ . Фізичні коефіцієнти:  
 $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\mu = 32$ . Визначити швидкість  $V$  руху кисню та супутні величини за формулами:

$$\beta = \frac{P_{cp}}{P_0}; \beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}}; V = \begin{cases} \sqrt{\left[ 2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{cp}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right]} & \text{при } \beta > \beta_{кр}; \\ \sqrt{\left[ 2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \right]} & \text{при } \beta \leq \beta_{кр}. \end{cases}$$

Прийняти  $P_{cp} = 3,2$  МПа.

2.8. На циліндр, що складений з натягом  $\delta = 12,3 \cdot 10^{-5}$  м з двох шарів розмірами  $a = 0,2$  м,  $b = 0,25$  м,  $c = 0,33$  м, діє зовнішній ( $P_3 = 330$  МПа) та внутрішній ( $P_B = 78$  МПа) тиск. Модуль пружності матеріалу циліндра  $E = 2,3 \cdot 10^5$  МПа. Визначити напруження  $\sigma_r$  та супутні величини за формулами:

$$P = \frac{\delta E}{2b^3} \frac{(c^2 - b^2) \cdot (b^2 - a^2)}{c^2 - a^2}; \quad \sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2; \quad \sigma_2 = \frac{a^2 P_B^2 - c^2 P_3}{c^2 - a^2} - \frac{(P_B - P_3) a^2 c^2}{r^2 (c^2 - a^2)};$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} -\frac{P b^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right), & a \leq r \leq b; \\ \frac{P b^2}{c^2 - b^2} \left( 1 + \frac{c^2}{r^2} \right), & b < r \leq c. \end{cases}$$

Прийняти:  $r = 0,23$  м.

2.9. Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня розмірами  $l = 2$  м та  $a = 1,5$  м, при температурі  $t_{нов} = 120$  °С, якщо її повздовж обтікає потік повітря зі швидкістю  $V$  та температурою

$t_{новим} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Фізичні параметри повітря:  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,0259 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  
 $Pr = 0,703$ .

Формули для розрахунку:

$$Q = \alpha(t_{нов} - t_{новим})S; \quad S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти:  $V = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.10. Визначити температуру  $T$  (та супутні величини) на відстані  $L$  від гарячої стінки камери печі. Стінка складається з шару червоної цегли (товщиною  $\delta_2 = 0,42 \text{ м}$ , теплопровідністю  $\lambda_2 = 0,71 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , її зовнішня поверхня нагріта до  $T_3 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), та шару піношамоту ( $\lambda_1 = 0,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\delta_1 = 0,3 \text{ м}$ ). Поверхня піношамоту, що у камері, нагріта до  $T_B = 1090 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Використовувати формули:

$$k = \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1}; \quad q = k(T_B - T_3); \quad T_c = T_B - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_c}{\delta_1} L, & 0 < L \leq \delta_1; \\ T_c - \frac{T_c - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,26 \text{ м}$ .

2.11. Знайти переміщення  $u$ , котрі виконають на відстані  $r$  від центру складового циліндра під дією внутрішнього тиску  $P_0 = 56,2 \text{ МПа}$ , якщо

$E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ , а геометричні параметри:

$r_1 = 0,12$  м;  $r_2 = 0,38$  м;  $r_3 = 0,48$  м;  $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  м.

Формули:

$$P = \frac{\delta E}{2r_2^3} \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{(r_3^2 - r_1^2)}; \quad u = u_1 + u_2; \quad u_2 = \frac{r_1^2 P_0}{E(r_3^2 - r_1^2)} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right];$$

$$u_1 = \begin{cases} -\frac{r_2^2 P}{(r_2^2 - r_1^2)E} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_1^2}{r} \right], & r_1 \leq r \leq r_2; \\ \frac{r_2^2 P}{(r_3^2 - r_2^2)E} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right], & r_2 < r \leq r_3. \end{cases}$$

Прийняти:  $r = 0,44$  м.

2.12. Теплоізоляційна стінка складається з шару шамотної цегли (товщиною  $\delta_1 = 0,24$  м), шару червоної цегли (товщиною  $\delta_2 = 0,04$  м) та термоізоляції (товщиною  $\delta_3 = 0,03$  м). Теплопровідність матеріалів, відповідно,  $\lambda_1 = 0,93 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda_3 = 0,135 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda_2 = 0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура середовища на кожній стороні стінки:  $T_{\text{гор}} = 1500$  °С;  $T_{\text{хол}} = 42$  °С. Коефіцієнти тепловіддачі, відповідно:  $\alpha_{\text{гор}} = 840 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $\alpha_{\text{хол}} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ . Визначити температуру  $T$  на глибині  $x$  стінки. Формули:

$$T_1 = T_{\text{гор}} - \frac{q}{\alpha_{\text{гор}}}; \quad T_2 = T_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_2} q; \quad T_3 = T_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} q; \quad T_4 = T_{\text{хол}} + \frac{q}{\alpha_{\text{хол}}};$$

$$q = k(T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}); \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\text{гор}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}};$$

$$T = \begin{cases} T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta_1} x, & 0 < x \leq \delta_1; \\ T_2 - \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} x, & \delta_1 < x \leq \delta_1 + \delta_2; \\ T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\delta_3} x, & \delta_1 + \delta_2 < x \leq \delta_1 + \delta_2 + \delta_3. \end{cases}$$

2.13. Визначити температуру  $T$  (та супутні величини) на глибині  $L$  в стінці термокамери, яка складається з магнезито-хромітового вогнетриву ( $\delta_1 = 0,2 \text{ м}$ ;  $\alpha_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ) та легкої цегли ( $\delta_2 = 0,08 \text{ м}$ ;  $\lambda_2 = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ). Коефіцієнт тепловіддачі від газів з  $T_{\text{газ}} = 1500 \text{ }^\circ\text{С}$  до поверхні стінки  $\lambda_c = 1150 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура ззовні камери  $T_{\text{зовні}} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$ . Питомий тепловий потік крізь стінку  $q = 420 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Формули:

$$T_B = T_{\text{газ}} - \frac{q}{\alpha_1}; \quad T_3 = T_{\text{зовні}} + \frac{q}{\alpha_2}; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad \alpha_2 = \frac{q}{T_{\text{газ}} - T_{\text{зовні}} - q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_B - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L < \delta_1 + \delta_2. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,21 \text{ м}$ .

2.14. Пруток діаметром  $d = 0,08 \text{ м}$  знаходиться в потоці газу, швидкість якого  $v$ . Фізичні властивості газу:  $\nu_T = 18,02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda_T = 2,88 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Прийняти  $v = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  поверхні прутка до газу та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d}; \quad \text{Re} = \frac{v d}{\nu_T};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.15. Визначити величину теплового потоку  $q$  до повітря від труби діаметром  $d = 0,012 \text{ м}$ , якщо труба має температуру  $t_c = 85 \text{ }^\circ\text{С}$ . Повітря має

середню температуру  $t_n = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , рухається зі швидкістю  $W = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  та

характеризується наступними теплофізичними величинами:  $\nu_m = 13,09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

$\lambda_m = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d; \quad \alpha = 0,22 \operatorname{Re}^{0,6} \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon; \quad \operatorname{Re} = \frac{Wd}{\nu_m}.$$

Прийняти в залежності від кута атаки потоку повітря  $\varphi$ :

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^{\circ}; \\ 0,89, & \varphi = 60^{\circ}; \\ 0,6, & 60^{\circ} > \varphi \geq 30^{\circ}. \end{cases}$$

2.16. Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня  $b = 0,65 \text{ м}$ ,  $l = 1,1 \text{ м}$ ,  $t_{\text{нов}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , якщо її повздовж обтікає потік повітря зі швидкістю  $W$  та температурою  $t_{\text{новім}} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Фізичні параметри повітря:  $\nu = 16,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,0255 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,701$ . Формули:

$$Q = \alpha (t_{\text{нов}} - t_{\text{новім}}) S; \quad S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad \operatorname{Re} = \frac{Wb}{\nu}; \quad Nu = \begin{cases} 0,66 \operatorname{Re}^{\frac{1}{2}} \operatorname{Pr}^{\frac{1}{3}}, & \operatorname{Re} \leq 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 \operatorname{Re}^{0,8}, & \operatorname{Re} > 5 \cdot 10^3. \end{cases}$$

Взяти:  $W = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.17. Теплообмінна трубка охолоджується сумішшю газів. Зовнішній діаметр трубки  $d = 0,0087 \text{ м}$ . Швидкість обтікання газів  $\nu$ . Фізичні властивості суміші:  $\nu_t = 1,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda_t = 2,13 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Прийняти  $\nu = 0,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Визначити

коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  поверхні трубки до газів та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d}; \quad Re = \frac{vd}{\nu_T};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.18. Пруток діаметром  $d = 24$  мм, охолоджується рідиною, параметри якої:  $\nu = 1,66 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $Pr = 8,67$ ;  $Pr_c = 4,1$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні прутка за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}; \quad Re = Ud/\nu;$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,5 \text{Re}^{0,5} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25 \text{Re}^{0,6} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку рідини  $U = 0,735 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.19. Потік повітря обтікає крило літака із швидкістю  $V = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає поверхня крила завдовжки  $l = 2$  м, завширшки  $a = 1,5$  м, температурою  $t_{\text{нов}} = 120$  °С. Температура повітря  $t_{\text{новім}} = 8$  °С. Фізичні параметри повітря:  $\nu = 15,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,029 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,7$ . Формули:

$$Q = \alpha(t_{nos} - t_{nosim})S; \quad S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu}; \quad Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.20. Фізичні величини середовища, в якому знаходиться теплообмінна секція діаметром  $d = 0,25$  м:  $\nu_m = 13,1 \cdot 10^{-6} \frac{M^2}{c}$ ;  $\lambda_m = 1,96 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{МК}$ ;  $Pr = 0,71$ ;  $g = 9,81 \frac{М}{c^2}$ . Температура, відповідно, секції та навколишнього середовища:  $t_c = 120$  °С;  $t_m = 18$  °С.

Визначити величину теплового потоку  $Q$  з поверхні циліндричної секції в оточуюче середовище (та супутні величини). Формули:

$$Q = \alpha(t_c - t_m)\pi d; \quad Nu = C(GrPr)^n; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d}; \quad GrPr = \frac{gd^3\beta(t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\beta = \frac{1}{273 + t_m}; \quad \begin{cases} C = 0,71, n = 0,24, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1,2 \cdot 10^9; \\ C = 0,18, n = 0,35, & (GrPr) > 6,1 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

2.21. Визначати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) від вертикального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 1 \cdot 10^{-2}$  м і висота  $h = 4$  м, та визначальна температура  $t_0 = 100$  °С, при якій відомі такі теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 2,3$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda = 0,032$  Вт/(м·К),  $Pr = 0,688$ . Також задані константи:  $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> і різниця між температурами паропроводу і середовища  $\Delta t = 150$  °С. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{h}; \quad Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$



2.22. На циліндр що складений з натягом  $\delta=12,3 \cdot 10^{-5}$  м з двох шарів розмірами  $a=0,12$  м,  $b=0,20$  м,  $c=0,36$  м, діє зовнішній  $P_3 = 280$  МПа та внутрішній  $P_B=60$  МПа тиск. Модуль пружності матеріалу циліндра  $E = 2,3 \cdot 10^5$  МПа. Визначити напруження  $\sigma_r$  та супутні величини за формулами:

$$P = \frac{\delta E}{2b^3} \frac{(c^2 - b^2) \cdot (b^2 - a^2)}{c^2 - a^2}; \quad \sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2; \quad \sigma_2 = \frac{a^2 P_B^2 - c^2 P_3}{c^2 - a^2} - \frac{(P_B - P_3) a^2 c^2}{r^2 (c^2 - a^2)};$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} -\frac{Pb^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right), & a \leq r \leq b; \\ \frac{Pb^2}{c^2 - b^2} \left( 1 + \frac{c^2}{r^2} \right), & b < r \leq c. \end{cases}$$

Прийняти:  $r = 0,18$  м.

2.23. Визначити величину теплового потоку  $q$  від калорифера діаметром  $d = 0,012$  м до повітря, якщо калорифер має температуру  $t_c = 70$  °С. Повітря має середню температуру  $t_n = 22$  °С, рухається зі швидкістю  $V = 2,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  та характеризується наступними теплофізичними величинами:  $\nu_m = 15,061 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

$\lambda_m = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d; \quad \alpha = \text{Nu}_m \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon; \quad \text{Nu}_m = 0,22 \text{Re}^{0,6}; \quad \text{Re} = \frac{Vd}{\nu_m}.$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1; & \varphi = 90^\circ; \\ 0,8; & \varphi = 60^\circ; \\ 0,92; & 120^\circ > \varphi > 90^\circ. \end{cases}$$

Де  $\varphi$  - кут атаки потоку повітря

2.24. Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup> К) від горизонтального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 6,2 \cdot 10^{-2}$  м і довжина  $L = 0,8$  м, температура стінки трубопроводу  $t_1 = 118$  °С, а температура середовища  $t_{\text{сер}} = 24$  °С. Визначальна температура процесу  $t_0 = 71$  °С, при якій відомі теплофізичні властивості повітря:  $Pr = 0,693$ ,  $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $\nu = 1,95 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 2,97 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Задано прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad \Delta t = t_1 - t_{\text{сер}}; \quad Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$

2.25. Визначати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  у повітря від зігнутої труби діаметром  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м і довжиною  $L = 2,1$  м до повітря (та супутні величини), якщо температура повітря  $t_{\text{сер}} = 100$  °С, а стінки труби  $t_{\text{ст}} = 20$  °С. Визначальна температура процесу  $t_0 = 60$  °С, при якій задані теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 23,13 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 3,21 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr_p = Pr_{\text{cm}} = 0,7$ . Задані швидкість повітря  $v = 5$  м/с, прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,3} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{\text{cm}}} \right)^{0,25}, & 2,2 \cdot 10^3 \leq Re < 1 \cdot 10^4; \\ 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{\text{cm}}} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^4 \leq Re < 5 \cdot 10^6. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

2.26. Відомі фізичні константи рідини, яка протікає по трубопроводу:

$$\lambda = 0,103 \frac{Bm}{m \cdot K}; Cp = 2,04 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot K}; \mu_c = 0,198 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_{жс} = 29,7 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

геометричні розміри:  $l = 1,1 \text{ м}$ ;  $d = 0,072 \text{ м}$ . Визначити коефіцієнт опору тертю  $\varepsilon$  при в'язкій течії рідини за формулами:

$$\varepsilon = \varepsilon_K \left( \frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^n; \varepsilon_K = \frac{64}{Re}; \pi = 3,1415; Pe \frac{l}{d} = \frac{4G}{\pi l} \frac{Cp}{\lambda};$$

$$\begin{cases} C = 2,31; m = -0,3, & \text{якщо } 130 < Pe \frac{l}{d} \leq 1500; \\ C = 0,535; m = -0,1, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} > 1500; \end{cases}$$

$$n = C \left( Pe \frac{l}{d} \right)^m \left( \frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,9}.$$

Прийняти:  $G = 2,3 \cdot 10^{-5}$ ;  $Re = 1300$ .

27. Мідний дріт діаметром  $d = 0,02 \text{ м}$  підвішений в потоці повітря, швидкість якого  $v$ , фізичні властивості:  $\nu_T = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ ;  $\lambda_T = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{Bm}{m \cdot K}$ .

Прийняти  $v = 1,2 \frac{м}{с}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  поверхні дроту до повітря та супутні величини за формулами:

$$\alpha = Nu_T \frac{\lambda_T}{d}; Re = \frac{v d}{\nu_T};$$

$$Num = \begin{cases} 0,44 Re^{0,5}, & 10 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,22 Re^{0,6}, & 1 \cdot 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

28. Трубка діаметром  $d = 12$  мм, охолоджується розчином, параметри якого:  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 0,572 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $Pr=9,4$ ;  $Pr_c=3,6$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні трубки  $\alpha$  за формулами:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{Ud}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку розчину  $U = 0,85 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

2.29. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup> К) від вертикального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 1,1 \cdot 10^{-2}$  м і  $H = 4,2$  м, температура  $t_1 = 170$  °С, а температура середовища  $t_{\text{сеп}} = 30$  °С. Визначальна температура процесу  $t_0 = 100$  °С, при якій відомі теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 2,2312 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 0,031 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $Pr = 0,692$ ,  $\beta = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Відомо  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ . Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{H}; \quad \Delta t = t_1 - t_{\text{сеп}}; \quad Gr = \frac{g \cdot H^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.30. Теплоізоляційна стінка складається з шару шамотної цегли (товщина шару  $\delta_1 = 0,24$  м), шару червоної цегли (товщина шару  $\delta_2 = 0,12$  м) та шару захисного покриття (товщина шару  $\delta_3 = 0,02$  м). Теплопровідність матеріалів, відповідно,  $\lambda_1 = 0,93 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda_3 = 0,135 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda_2 = 0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура

середовища на кожній стороні стінки:  $T_{\text{гор}} = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{хол}} = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнти тепловіддачі, відповідно:  $\alpha_{\text{гор}} = 840 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  ;  $\alpha_{\text{хол}} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ . Визначити температуру  $T$  на глибині  $x$  стінки. Формули:

$$q = k(T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}) ;$$

$$T_1 = T_{\text{гор}} - \frac{q}{\alpha_{\text{гор}}} ; \quad T_2 = T_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q ; \quad T_3 = T_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} q ; \quad T_4 = T_{\text{хол}} + \frac{q}{\alpha_{\text{хол}}} ;$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гор}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}}$$

$$T = \begin{cases} T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta_1} x, & 0 < x \leq \delta_1 ; \\ T_2 - \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} x, & \delta_1 < x \leq \delta_2 + \delta_1 ; \\ T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\delta_3} x, & \delta_2 < x \leq \delta_3 + \delta_2 + \delta_1 . \end{cases}$$

Прийняти  $x = 0,2 \text{ м}$ .

2.31. Визначити температуру  $T$  на глибині  $L$  стінки сушильної камери виготовленої з червоної цегли товщиною  $\delta_1 = 0,25 \text{ м}$ , теплопровідністю  $\lambda_1 = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ , що покрита ззовні термопокриттям товщиною  $\delta_2$  (значення вивести на друк), теплопровідність  $\lambda_2 = 0,047 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Питомі втрати теплоти крізь стінку складають  $q = 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура стінок камери: внутрішньої –  $T_B = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , зовнішньої –  $T_3 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Формули:

$$\delta_2 = \lambda_2 \frac{T_B - T_3}{q} ; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2} ;$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,21 \text{ м}$ .

2.32. Визначити величину теплового потоку  $Q$  з поверхні циліндричної секції батареї в оточуюче середовище, якщо фізичні коефіцієнти:

$$\nu_m = 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \lambda_m = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}; \beta = \frac{1}{273 + t_m}; Pr = 0,7; g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \text{ Формули:}$$

$$Q = \alpha(t_c - t_m)\pi d; \quad Nu = C(GrPr)^n; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d}; \quad GrPr = \frac{gd^3\beta(t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\begin{cases} C = 0,75, n = 0,25, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1 \cdot 10^9; \\ C = 0,15, n = 0,33, & (GrPr) > 6 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

Прийняти:  $t_c = 220^\circ \text{C}$ ;  $t_m = 35^\circ \text{C}$  – температура, відповідно, батареї та навколишнього середовища;  $d = 0,36 \text{ м}$  – діаметр циліндричної секції.

2.33. З резервуара, тиск та температура в якому сталі величини ( $P_0 = 6,3 \text{ МПа}$ ;  $T_0 = 370 \text{ К}$ ), через конфузorne сопло, у апарат подається кисень, де тиск падає до  $P_{cp}$ . Показник адіабати кисню  $k = 1,42$ . Фізичні коефіцієнти відомі:  $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\mu = 32$ . Визначити швидкість  $V$  втікання кисню та супутні величини за формулами:

$$\beta = \frac{P_{cp}}{P_0}; \quad \beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad V = \begin{cases} \sqrt{\left[ 2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_{cp}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right]} & \text{при } \beta > \beta_{кр}; \\ \sqrt{\left[ 2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \right]} & \text{при } \beta \leq \beta_{кр}. \end{cases}$$

Прийняти  $P_{cp} = 3,2$  МПа .

2.34. Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup> К), від горизонтального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м і довжина  $L = 4$  м, якщо визначальна температура  $t_0 = 69$  °С, при якій відомі такі теплофізичні властивості повітря:  $Pr = 0,690$ ,  $\beta = 3,0 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $\nu = 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 2,95 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ ;  $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Різниця між температурою паропроводу і середовища  $\Delta t = 105$  °С. Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} ; \quad Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t ;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.35. Визначати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , у повітря від зігнутої труби діаметром  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м і довжиною  $L = 2,1$  м до повітря (та супутні величини), якщо температура повітря  $t_{сер} = 100$  °С, а стінки труби  $t_{cm} = 20$  °С. Визначальна температура процесу  $t_0 = 60$  °С, при якій задані теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 22,92 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 2,95 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ ;  $Pr_p = Pr_{cm} = 0,7$ . Задані константи:  $n = 0,43$ ;  $m = 0,8$ ;  $k = 0,25$ ;  $p = 1,3$ ;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Прийняти: швидкість повітря  $v = 5$  м/с. Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} ; \quad Re = \frac{v \cdot d}{\nu} ;$$

$$Nu = \begin{cases} 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^p \cdot Pr_p^n \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^k, & 2,3 \cdot 10^3 \leq Re < 1,1 \cdot 10^4; \\ 0,021 \cdot Re^m \cdot Pr_p^n \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^k, & 1,1 \cdot 10^4 \leq Re < 4,8 \cdot 10^6. \end{cases}$$

2.36. Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня розмірами  $l = 2$  м,  $a = 1,5$  м, при температурі  $t_{нов} = 120$  °С, якщо її повздовж обтікає потік газу зі швидкістю  $V$  та температурою  $t = 20$  °С.

Фізичні параметри газу:  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ ,  $\lambda = 0,0259 \frac{Вт}{м \cdot К}$ ,  $Pr = 0,703$ . Формули:

$$S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu}; \quad Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^3; \end{cases}$$

$$Q = \alpha(t_{нов} - t)S$$

Взяти:  $V = 3,7 \frac{м}{с}$ .

2.37. Визначити температуру  $T$  (та супутні величини) на відстані  $L$  від поверхні гарячої стінки камери печі. Стінка складається з шару червоної цегли (товщиною  $\delta_2 = 0,42$  м, теплопровідністю  $\lambda_2 = 0,71 \frac{Вт}{м \cdot К}$ , її зовнішня поверхня нагріта до  $T_3 = 40$  °С), та шару піношамоту ( $\lambda_1 = 0,43 \frac{Вт}{м \cdot К}$ ;  $\delta_1 = 0,3$  м). Поверхня піношамоту, що у камері, нагріта до  $T_B = 1090$  °С. Формули:

$$T_C = T_B - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$k = \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1}; \quad q = k(T_B - T_3); \quad T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 < L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,34$  м.



2.38. Знайти переміщення  $u$ , котрі відбуваються на відстані  $r$  від центру складового циліндру під дією внутрішнього тиску  $P_0 = 56,2$  МПа, якщо  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ , а геометричні параметри складового циліндру:  $r_1 = 0,12$  м;  $r_2 = 0,38$  м;  $r_3 = 0,48$  м;  $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  м. Формули:

$$P = \frac{\delta E}{2r_2^3} \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{(r_3^2 - r_1^2)}; \quad u = u_1 + u_2; \quad u_2 = \frac{r_1^2 P_0}{E(r_3^2 - r_1^2)} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right];$$

$$u_1 = \begin{cases} -\frac{r_2^2 P}{(r_2^2 - r_1^2)E} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_1^2}{r} \right], & r_1 \leq r \leq r_2; \\ \frac{r_2^2 P}{(r_3^2 - r_2^2)E} \left[ (1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right], & r_2 < r \leq r_3. \end{cases}$$

Прийняти:  $r = 0,44$  м.

2.39. Визначати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , від вертикального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 1 \cdot 10^{-2}$  м і висота  $h = 4$  м та відомі такі теплофізичні властивості повітря:  $\lambda = 0,032 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,688$ . Також задані  $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  і різниця між температурою паропроводу і середовища  $\Delta t = 150$  °С. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}; \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{h}; \quad Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$

Прийняти:  $\nu = 2,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

2.40. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  від вертикального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його визначальний розмір

$H$  (прийняти  $H = 4,2$  м), температура  $t_1 = 170$  °С, а температура середовища  $t_{сер} = 30$  °С. Відомі теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 2,313 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,031 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,692$ ,  $\beta = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$ . Задано  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Формули для розрахунку:

$$\Delta t = t_1 - t_{сер}; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{H}; \quad Gr = \frac{g \cdot H^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.41. Визначити температуру  $T$  (та супутні величини) на глибині  $L$  в стінці термокамери, яка складається з магнезито-хромітового вогнетриву ( $\delta_1 = 0,2$  м;  $\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ) та легкої цегли ( $\delta_2 = 0,08$  м;  $\lambda_2 = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ). Коефіцієнт тепловіддачі від газів з  $T_{газ} = 1500$  °С до поверхні стінки  $\alpha_1 = 1150 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Температура зовні камери  $T_{зовн} = 30$  °С. Питомий тепловий потік крізь стінку  $q = 420 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Формули:

$$T_B = T_{газ} - \frac{q}{\alpha_1}; \quad T_3 = T_{зовн} + \frac{q}{\alpha_2}; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad \alpha_2 = \frac{q}{T_{газ} - T_{зовн} - q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_B - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L < \delta_1 + \delta_2. \end{cases}$$

Прийняти:  $L = 0,21$  м.

2.42. Пруток діаметром  $d = 0,08$  м знаходиться в потоці газу, швидкість якого  $v$ . Фізичні властивості газу:  $\nu_t = 18,02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda_t = 2,88 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Прийняти  $\nu = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  з поверхні прутка до газу та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_t}{d}; \quad \text{Re} = \frac{vd}{\nu_t};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.43. Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , від горизонтального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d$  (прийняти умовно  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м), якщо відомі такі теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,0295 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,690$ ,  $\beta = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$ . Задано також прискорення вільного падіння  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Різниця між температурою паропроводу і середовища  $\Delta t = 105 \text{ }^\circ\text{С}$ . Формули для розрахунку:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t; \quad \alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,54 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.44. Визначити величину теплового потоку  $q$  від труби гарячого водопостачання діаметром  $d = 0,012$  м до повітря, якщо труба має температуру стінки  $t_c = 85 \text{ }^\circ\text{С}$ . Повітря має середню температуру  $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ , рухається зі

швидкістю  $W = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  та характеризується наступними теплофізичними величинами:  $\nu_m = 13,09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda_m = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d; \alpha = 0,22 \text{Re}^{0,6} \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon; \text{Re} = \frac{Wd}{\nu_m}.$$

Прийняти в залежності від кута атаки потоку повітря  $\varphi$ :

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^\circ; \\ 0,89, & \varphi = 60^\circ; \\ 0,6, & 60^\circ > \varphi \geq 30^\circ. \end{cases}$$

2.45. Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня з розмірами  $b = 0,65$  м,  $l = 1,1$  м, при температурі  $t_{нов} = 100$  °С, якщо її повздовж обтікає потік повітря, зі швидкістю  $W$  та сталою температурою  $t_{новім} = 12$  °С. Фізичні параметри повітря:  $\nu = 16,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,0255 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,701$ . Формули:

$$Q = \alpha (t_{нов} - t_{новім}) S; S = 2la; \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \text{Re} = \frac{Wb}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,66 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, & \text{Re} \leq 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 \text{Re}^{0,8}, & \text{Re} > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Взяти:  $W = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.46. Теплообмінна трубка охолоджується сумішшю газів. Зовнішній діаметр трубки  $d = 0,0087$  м. Швидкість обтікання газів  $v$ . Фізичні властивості

суміші:  $\nu_m = 1,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda_m = 2,13 \times 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Прийняти  $\nu = 0,33 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  поверхні трубки до газів та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d}; \quad \text{Re} = \frac{\nu d}{\nu_T};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.47. Пруток діаметром  $d = 24$  мм, охолоджується рідиною, параметри якої:  $\nu = 1,66 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $Pr = 8,67$ ;  $Pr_c = 4,1$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні прутка за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}; \quad \text{Re} = \frac{Ud}{\nu};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,5 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,38} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq \text{Re} \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25 \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,38} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку рідини  $U = 0,735 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.48. Потік повітря обтікає крило літака із швидкістю  $V$ . Визначати кількість теплоти  $Q$  (та супутні величини), яку втрачає поверхня крила розмірами  $l = 2$  м,  $h = 1,5$  м, при  $t_{\text{нов}} = 120$  °С. Прийняти  $V = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Температура повітря  $t_{\text{новім}} = 8$  °С. Фізичні параметри повітря:  $\nu = 15,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 0,029 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $Pr = 0,7$ . Формули:

$$Q = \alpha(t_{\text{ног}} - t_{\text{ногim}})S; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{V l}{\nu}; \quad S = 2lh;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.49. Фізичні величини середовища, в якому знаходиться теплообмінна секція діаметром  $d$  (прийняти  $d = 0,25$  м):  $\nu_m = 13,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\lambda_m = 1,96 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ ;  $Pr = 0,71$ ;  $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Температура, відповідно, секції та навколишнього середовища:  $t_c = 120$  °С;  $t_m = 18$  °С.

Визначити величину теплового потоку  $Q$  з поверхні циліндричної секції в оточуюче середовище (та супутні величини). Формули:

$$Q = \alpha(t_c - t_m) \pi d l; \quad Nu = C(GrPr)^n; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d}; \quad GrPr = \frac{g d^3 \beta (t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\beta = \frac{1}{273 + t_m}; \quad \begin{cases} C = 0,71, n = 0,24, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1,2 \cdot 10^9; \\ C = 0,18, n = 0,35, & (GrPr) > 6,1 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

2.50. Знайти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , від горизонтального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр  $d = 5,5 \cdot 10^{-2}$  м, температура стінки трубопроводу  $t_1 = 106$  °С, а температура середовища встановилася на рівні  $t_{\text{сер}} = 22$  °С. Відомі теплофізичні властивості повітря:  $\nu = 1,95 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 2,97 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} 1/\text{К}$ . Задано прискорення вільного падіння  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad \Delta t = t_1 - t_{\text{сер}}; \quad Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

Прийняти:  $P_r = 0,67$ .

### 3. Робота з електронними таблицями. Будування діаграм

Засобами *Excel* обчислити залежності  $y = f(x)$  та  $q = q(x)$  (дивись завдання). Побудувати діаграму для отриманих функцій. Дані, що розраховані, зберегти також як «текстовий файл *MSDOS*». Експортувати дані текстового файлу до *Excel* за допомогою Майстра експортування. Проаналізувати результати та відмітити область визначення функцій. Сформулювати висновки.

$$3.1. y = 26.8N \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3, \quad x = 0 \dots 2\pi, N = 18.2, k = 1.6, c = 3$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{при } x = 0 \dots \pi, 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos x & \text{при } x = \pi \dots 2\pi, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.2. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0.16c}{q^k G} + 1, \quad x = 0 \dots 2\pi, k = 2, G = 2\pi, c = 1.2$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & \text{при } x = 0 \dots 2, 0 \leq x < 2 \\ 12.1k - 4, & \text{при } x = 2 \dots \pi, 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.3. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, \quad x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143 & \text{при } x = 0 \dots 1, 0 \leq x < 1 \\ 0.36G + 18.1 & \text{при } x = 1 \dots 2\pi, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.4. y = \frac{\sqrt{G 2\pi/3} + \sin(x - 2\pi/3)}{12.6qG^c} + 12.2, \quad x = 0 \dots 2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} c + 1.1, & 0 \leq x < 1.1 \\ q = 0.625 + 14.2\pi c, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.5. y = \frac{615\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{16.2qc(G-3)} + 12, x = 0...2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2\cos(x), & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.6. y = 18.7 \frac{tg(x)}{13.5cG^c q} - 2, x = 0... \pi/4, c = 0.3, G = 18$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{npu } x = 0... \pi/16 \\ q = 2\cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.7. y = tg(x) + \frac{18.7 \sin(x - 2\pi/3)}{qcG}, x = 0... \pi/6, G = 11.1, c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 16.2 \text{ npu } x = 0... \pi/16 \\ q = \cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/6 \end{cases}$$

$$3.8. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0.16c, x = 0...2\pi, k = 0.25, G = 2\pi, c = 95$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & 0 \leq x < 2 \\ 12.1k + 4, & 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.9. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32.1c, x = 0...2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 6.2c - 12, & 0 \leq x < 1.1 \\ 0.36G + 18.1, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.10. y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G-3)} + 6.12 * q, x = 0...2\pi, g = 76.1, c = 10$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2, & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.11. y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, k = 18.2, c = 3, x = 0...2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & 0 \leq x < \pi \\ 12.1k - 4, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.12. y = 18.6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{k}{6qk^c}, k = 18.2, c = 3, x = 0..2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.2c - 6, & 0 \leq x < \pi \\ 11k - 4.2, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$



$$3.13. \quad y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3.12c}{G^c}, c = 0.12, G = 124, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 6.54c - 0.143, & 0 \leq x < 1 \\ 0.25G - 16, & 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.14. \quad y = \frac{\sqrt{G2\pi/3} + \cos(x - 2\pi/3)}{12.2qG^c} + 12.1, x = 0 \dots 2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} q = c + 2, & 0 \leq x < \pi \\ q = 0.6 + 14.3\pi c, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.15. \quad y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16.2qc(G - 3)} + 11.7, x = 0 \dots 2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi \\ q = 2\cos(x), & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.16. \quad y = \frac{2.16 \sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, & 0 \leq x < 1 \\ 0.3G + 12.1, & 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.17. \quad y = \frac{\sqrt{G\pi} + \cos(x - 2\pi/3)}{15.6qG^{2c}} + 13.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 121, c = 0.25$$

$$q = \begin{cases} q = c + 1.12, & 0 \leq x \leq \pi \\ q = 0.27 + 12.7\pi c, & \pi < x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.18. \quad y = \operatorname{tg}(x) + \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{qc} + G13.2, x = 0 \dots \pi/4, G = 11.1, c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 18.1 & \text{npu } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(x) & \text{npu } \pi/6 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.19. \quad y = \operatorname{arctg}(x) + \frac{\sqrt{30G - 6.2}}{qc}, x = 0 \dots 1, G = 1.6, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & x = 0 \dots 0.5 \\ q = \sin(x), & 0.5 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$3.20. \quad y = \lg G + \frac{\operatorname{tg}(x)}{qc}, x = 0 \dots 2\pi/7, G = 18.7, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = 16c, & x = 0 \dots 2\pi/6 \\ q = -16c, & 2\pi/6 < x \leq 2\pi/7 \end{cases}$$

$$3.21. y = \frac{18.7 \operatorname{tg}(x)}{13.5cqG} - 12.7, x = 0 \dots \pi/4, c = 0.3, G = 18.7$$

$$q = \begin{cases} q = \sqrt{52G}, & x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \sin(x), & \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.22. y = \frac{\sin(\pi x - 3)}{G18.1q} - \sqrt{12G + k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 25 \cos(x) & x = 0 \dots \pi/2 \\ q = 0.13\sqrt{k+11}, & \pi/2 < x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.23. y = 26.8N \frac{\sin(\pi - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3, x = 0 \dots 2\pi, N = 18.2, k = 1.6, c = 3$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{npu } x = 0 \dots \pi \quad 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos x & \text{npu } x = \pi \dots 2\pi \quad \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.24. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0.16c}{q^k G} + 1 \quad x = 0 \dots 2\pi, k = 2, G = 2\pi, c = 1.2$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & \text{npu } x = 0 \dots 2, 0 \leq x < 2 \\ 12.1k - 4, & \text{npu } x = 2 \dots \pi, 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.25. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4 \quad x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143 \text{ npu } x = 0 \dots 1, 0 \leq x < 1 \\ 0.36G + 18.1 \text{ npu } x = 1 \dots 2\pi, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.26. y = \frac{\sqrt{2\pi G/3} + \sin(0.8x)}{12.6qG^c} + 12.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} c + 1.1, & 0 \leq x < 1.1 \\ q = 0.625 + 14.2\pi c, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.27. y = \frac{615\sqrt{G - 12 \sin(2.2x)}}{16.2qc(G - 3)} + 12, x = 0 \dots 2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2 \cos(x), & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.28. y = 18.7 \frac{\operatorname{tg}(x)}{13.5 * c * G^c * q} - 2, x = 0 \dots \pi/4, c = 0.3, G = 18$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{npu } x = 0 \dots \pi/16 \\ q = 2 \cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.29. y = tg(x) + \frac{18.7 \sin(x - 2\pi/3)}{q * c * G}, x = 0...2\pi, G = 11.1, c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 16.2 \text{ npu } x = 0... \pi/16 \\ q = \cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.30. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0.16c, x = 0...2\pi, k = 0.25, G = 2\pi, c = 95$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, 0 \leq x < 2 \\ 12.1k + 4, 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.31. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32.1c, x = 0...2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 6.2c - 12, 0 \leq x < 1.1 \\ 0.36G + 18.1, 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.32. y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G - 3)} + 6.12q, x = 0...2\pi, g = 76.1, c = 10$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2, \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.33. y = 18.6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{k}{6qk^c}, k = 18.2, c = 3, x = 0...2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.2c - 6, 0 \leq x < \pi \\ 11k - 4.2, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.34. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3.12c}{G^c}, c = 0.12, G = 124, x = 0...2\pi$$

$$q = \begin{cases} 6.54c - 0.143, 0 \leq x < 1 \\ 0.25G - 16, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.35. y = \frac{\sqrt{G2\pi/3} + \cos(x - 2\pi/3)}{12.2qG^c} + 12.1, x = 0...2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} q = c + 2, 0 \leq x < \pi \\ q = 0.6 + 14.3\pi c, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.36. y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16.2qc(G - 3)} + 11.7, x = 0...2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos(x), \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.37. y = \frac{2.16 \sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0...2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, 0 \leq x < 1 \\ 0.3G + 12.1, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.38. \quad y = \frac{\sqrt{G\pi} + \cos(x - 2\pi/3)}{15.6qG^{2c}} + 13.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 121, c = 0.25$$

$$q = \begin{cases} q = c + 1.12, 0 \leq x \leq \pi \\ q = 0.27 + 12.7\pi c, \pi < x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.39. \quad y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, k = 18.2, c = 3, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} q = 18.1 & \text{npu } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(x) & \text{npu } \pi/6 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.40. \quad y = \arctg(x) + \frac{\sqrt{30G - 6.2}}{qc}, x = 0 \dots 1, G = 1.6, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), x = 0 \dots 0.5 \\ q = \sin(x), 0.5 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$3.41. \quad y = \lg G + \frac{tg(x)}{qc}, x = 0 \dots 2\pi/13, G = 18.7, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = 16c, x = 0 \dots 2\pi/6 \\ q = -16c, 2\pi/6 < x \leq 2\pi/13 \end{cases}$$

$$3.42. \quad y = \frac{18.7tg(x)}{13.5cqG} - 12.7, x = 0 \dots \pi/4, c = 0.3, G = 18.7$$

$$q = \begin{cases} q = \sqrt{52G}, x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \sin(x), \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.43. \quad y = \frac{\sin(\pi x - 3)}{G18.1q} - \sqrt{12G + k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 25\cos(x) x = 0 \dots \pi/2 \\ q = 0.13\sqrt{k + 11}, \pi/2 < x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.44. \quad y = \frac{2.16\sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, 0 \leq x < 2 \\ 0.3G + 12.1, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.45. \quad y = \frac{\sin(x - 3)}{G1.1q} - \sqrt{4G + 0.6k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 22 \cos(x) & x = 0 \dots \pi / 2 \\ q = 0.1 \sqrt{k+11}, & \pi / 2 < x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.46. \quad y = \frac{\sqrt{18c} + \sin(0.4 + x)}{11qG^c} + 12.2, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 118.1, \quad c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} c + 1.11, & 0 \leq x < 1.1 \\ q = 0.25 + 1.2\pi c, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.47. \quad y = \operatorname{tg}(0.6x) + \frac{\sin(x - \pi/3)}{qc} + G13.2, \quad x = 0 \dots \pi/4, \quad G = 11.1, \quad c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 12.1 & \text{при } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(6x) & \text{при } \pi/6 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.48. \quad y = 19.2c \frac{\sin(x - 2.2\pi/3)}{4qk^c} + 12, \quad k = 18.2, \quad c = 2, \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.18c - 12, & 0 \leq x < \pi \\ 11.1k - 2, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.49. \quad y = \frac{25\sqrt{G - \sin(2x)}}{13.2qc(0.22G - 3)} + 12, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 76.2, \quad c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = 2 \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = \cos(x), & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.50. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0.1c}{G^k c} + 1 \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad k = 2, \quad G = 2\pi, \quad c = 1.2$$

$$q = \begin{cases} 0.148c - 10.2, & \text{при } x = 0 \dots 2, \quad 0 \leq x < 2 \\ 11.1k - 3.4, & \text{при } x = 2 \dots \pi, \quad 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.51. \quad y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, \quad k = 18.2, \quad c = 3, \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & 0 \leq x < \pi \\ 12.1k - 4, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

#### 4. Циклічні обчислювальні процеси

4.1. Для пластини  $l = 1,8$  м в турбулентному повздовжньому потоці повітря  $V = 78$  м/с визначити значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і товщину прикордонного слою  $\delta$ : а) для координат  $x$  від 0,01 м до 1,7 м з кроком 0,01 м; б) для координат  $x$ , що приймають значення: 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15;

0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0. Фізичні константи:  $\nu = 14,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Формули:

$$\delta = 0,37 \cdot x \cdot \text{Re}^{-0,2}; \text{Nu} = 2,55 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0,8}; \alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{x}; \text{Re} = \frac{IV}{\nu}.$$

4.2. Визначити напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  та переміщення  $u$  у товстостінному циліндрі з радіусами  $r_1 = 0,12$  м,  $r_2 = 0,28$  м під дією внутрішнього  $p_1 = 180$  МПа та зовнішнього  $p_2 = 12$  МПа тиску. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ . Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}; \sigma_t = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати  $\sigma_t$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ ,  $R$  з кроком по радіусу  $\Delta R = \begin{cases} 0,01 \text{ якщо } r < R < 0,2; \\ 0,02 \text{ якщо } 0,2 \leq R \leq r_2. \end{cases}$

Визначити окремо  $\sigma_t$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ , при  $R = 0,133; 0,1387; 0,1432; 0,177; 0,181; 0,203; 0,234; 0,236$ .

4.3. Термокамера має піношамотні стінки, товщиною  $\delta = 0,35$  м. Температура внутрішньої поверхні стінок  $t_{c1} = 1000$  °С, зовнішньої –  $t_{c2} = 60$  °С. Теплопровідність  $\lambda_0 = 0,92 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . Визначити температуру  $T^*$  стінки, перепад температур  $\Delta T$  та супутні величини: а) на глибині  $x = 0; 0,05; 0,1; 0,13; 0,15; 0,18; 0,2; 0,3; 0,31$  м; б) на глибині  $x$  від 0,1 м до 0,35 м з кроком 0,002 м. Формули:

$$T = 273 + \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2 \cdot gx}{\lambda_0 \cdot \beta} - \frac{1}{\beta}}; \quad g = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2}); \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta \cdot \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right);$$

$$T^* = 273 + t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot x; \quad \beta = \frac{1}{273 + t_{c1}}; \quad \Delta T = T - T^*.$$

4.4. Перегородка трубопроводу радіусом  $a = 0,36$  м та товщиною  $k = 0,03$  м знаходяться під дією тиску ацетилену  $p = 0,28$  МПа. Визначити напруження  $\delta_r$ ,  $\delta_\tau$ , а також прогин перегородки  $W$ , якщо вона зроблена з сталі (модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,31$ ) з кроком по радіусу  $\Delta r = 0,005$ , а також в точках:  $r = 0; 0,008; 0,01; 0,012; 0,018; 0,022; 0,028; 0,29$  м. Формули:

$$\delta_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]; \quad \delta_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$W = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3; \quad R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.5. З резервуару, з температурою  $T_0 = 380$  К та під тиском  $P_0 = 5$  МПа, через конфузorne сопло витікає кисень у середовище з тиском  $P = 1 \dots 4,8$  МПа. Коефіцієнт адіабати  $K = 1,4$ ;  $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\mu = 32$ . Визначити швидкість витікання кисню  $V$  в залежності від тиску  $P$  з кроком  $0,5$  МПа, а також при дії тиску  $P = 1,1; 1,3; 1,8; 2,1; 2,73; 3,8; 4,6; 4,7$  МПа. Формула:

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}.$$

4.6. Піч, що обертається, має стінку товщиною  $\delta = 0,2$  м та теплопровідністю  $\lambda = 4,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ . Температура в печі  $t_g = 1300$  °С, ззовні  $t_n = 28$  °С.

Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище  $\alpha_H = 32 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ , у середині печі

$$\alpha_g = 200; 300; 400; 600; 800; 1100; 1200; 1250; 1300; 1400; 1600; 2000; 3000; 4000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, тепловий потік тощо від коефіцієнта  $\alpha_g$ . Формули:

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_g}; \quad t_2 = t_H + \frac{q}{\alpha_H}; \quad q = \frac{t_g - t_H}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}}.$$

Розрахувати шукані величини також за умови  $\alpha_g = 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ , для значень

$\delta = 0,02 \dots 0,4$  м з кроком 0,02 м.

4.7. Футерівка камери для сушіння клінкеру складається з шарів шамотної ( $\delta_1 = 0,15$  м;  $\lambda_1 = 0,95 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ) та червоної ( $\delta_2 = 0,25$  м;  $\lambda_2 = 3,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ) цегли.

Температура у камері  $t_g = 950$  °С, ззовні –  $t_{\text{сеп.}} = 20$  °С. Визначити температури  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  на поверхні стінки камери та між шарами в залежності від коефіцієнта тепловіддачі

$$\alpha_g = 300; 350; 400; 450; 520; 535; 600; 670; 700; 720; 790; 810; 830; 870; 900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}. \quad \text{Врахувати}$$

$$\alpha_c = 320 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}. \text{ Розрахувати також залежність } q = f(\alpha_g), \quad \alpha_g = 300 \dots 900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \text{ з кроком}$$

$$50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}. \text{ Формули:}$$

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_g}; \quad t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad t_3 = t_{\text{сеп.}} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad q = \frac{t_g - t_{\text{сеп.}}}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$



4.8. Пластина має довжину  $l=3$  м та знаходиться в потоці рідини. Визначити залежність товщини гідродинамічного шару рідини  $\delta$  на відстані  $x = 0,1; 0,25; 0,28; 0,3; 0,36; 0,39; 0,41; 0,5; 0,6; 0,7; 0,81; 0,9; 0,95; 1,0; 1,3; 1,7; 1,9$  м, якщо  $\nu = 3,2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $t_0 = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $Pe = 0,703$  – параметри рідини в потоці, а  $\lambda = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ . Також визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від координати  $x$ , за умови  $x = 0,5 \dots l$  м з кроком 10 см. Формули:

$$\delta = \frac{4,64x}{\sqrt{Re}}; \quad Re = \frac{\nu x}{\nu}; \quad \alpha = \mu_u \frac{\lambda}{x}; \quad \mu_u = 0,335 Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pe^{\frac{1}{3}}.$$

4.9. Подвійна термостінка виготовлена з магнєзітохроміта ( $\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ ) товщиною  $\delta_1$  та шамотної лещадки ( $\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ ) товщиною  $\delta = 0,06$  м. Температура однієї з сторін стінки  $t_{\text{top}} = 1400 \text{ } ^\circ\text{C}$ , другої –  $t_{\text{хол}} = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Коефіцієнти тепловіддачі від стінки  $\alpha_2 = 31 \text{ Вт}/(\text{м К})$ . Тепловий потік крізь стінку  $\theta = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ . Визначити температуру поверхонь стінок  $t_1, t_2, t_3$  в залежності від товщини слою:  $\delta_1 = 0,3; 0,28; 0,25; 0,22; 0,2; 0,18; 0,15; 0,13; 0,11; 0,1; 0,08; 0,07; 0,06$  м. Окремо визначити коефіцієнт  $\alpha_1$ , якщо  $\delta = 0,3 \dots 0,05$  м з кроком 0,05 м. Формули:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta}; \quad t_1 = t_{\text{top}} - \frac{\theta}{\alpha_1}; \quad t_3 = t_2 - \theta \frac{\lambda_2}{\delta_2}; \quad t_2 = t_1 - \theta \frac{\lambda_1}{\delta_1}; \quad \beta = \frac{t_{\text{top}} - t_{\text{хол}}}{\theta} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

4.10. По трубопроводу рухається вода зі швидкістю  $g = 0,28$  м/с. Температура стінок трубопроводу  $t_c = 62 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Довжина трубопроводу  $l = 2,2$  м. Температура води на вході  $t_{\text{вх}} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$ , на виході  $t_{\text{вих}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , якщо діаметр трубопроводу  $d = 0,003; 0,006; 0,009$ ;

0,01; 0,012; 0,015; 0,018; 0,021; 0,025; 0,03 м, а також окремо величину теплового потоку  $Q$  в залежності від діаметру  $d$ , якщо діапазон його зміни складає від 0,005 м до 0,03 м з кроком 0,0025 м. Фізичні коефіцієнти прийняти:  $\nu_{жс} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $C_p = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_{жс} = 0,63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\rho_{жс} = 998,6 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu_{жс} = 1156 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_c = 550,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Формули:

$$Q = \alpha [t_c - 0,5(t_{ex} + t_{enx})] \pi d l;$$

$$Nu = 1,55 \left( Pe \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon; \varepsilon = 0,6 \left( \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right);$$

$$G = \rho_{жс} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad Re = \frac{gd}{\nu_{жс}}; \alpha = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad Pe \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{жс}}.$$

4.11. Компресор стискає газ від  $P_1 = 2,56 \text{ кг}/\text{см}^2$  до  $P_2 = 17 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Початкова температура газу  $t_1 = 8^\circ \text{C}$ ; КПД компресора  $\eta = 0,72$ . Теплофізичні константи:  $k = 1,3$ ;  $R = 489,2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\gamma = 0,761 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Визначити потужність  $N$ , Вт, що споживається компресором у залежності від об'єму газу  $V$ , при його зміні від 100 до 500  $\text{м}^3/\text{год}$  з кроком 10  $\text{м}^3/\text{год}$ , а також теоретичну роботу  $L$ , Дж/кг, для значень  $V = 112; 136; 152; 164; 183; 194; 202; 302; 430; 470; 493 \text{ м}^3/\text{год}$ . Формули:

$$N = \frac{GL}{3600\eta 10^3}; \quad G = V\gamma; \quad L = \frac{k}{k-1} R t_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

4.12. Теплоізоляція стінки печі виконана з волокнистого матеріалу товщиною  $\delta_2 = 0,11 \text{ м}$ , а саме стінка – з вогнетриву товщиною  $\delta_1 = 0,2 \text{ м}$ . Температура термоізоляції усередині печі  $T_{гор} = (1400 + 273) \text{ К}$ , навколишнього середовища ззовні печі  $T_{о.с} = (28 + 273) \text{ К}$ , коефіцієнт тепловіддачі у

навколишнє середовище  $\alpha = 48 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Визначити величину теплового потоку для двох випадків.

а) при наявності термоізоляції за формулою:

$$q = \frac{T_1 - T_{o.c.}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}},$$

якщо коефіцієнти теплопровідності  $\lambda_1 = 5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_2 = (0,02 \dots 0,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , з кроком  $0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

б) у відсутності термоізоляції за формулою:

$$q = \frac{T_1 - T_{o.c.}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha}},$$

якщо коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = (20; 18; 10; 7; 5; 3; 1,6; 1,1; 0,6) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Також визначити температуру на зовнішній поверхні стінки  $T_{хол}$  і температуру на границі вогнетрив-термоізоляція  $T_{гран.}$  за умов варіанта а).

Формули:

$$T_{гран.} = T_{гор.} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad T_{хол.} = T_{o.c.} + \frac{q}{\alpha}.$$

4.13. У кристалізаторі безперервної дії відбувається кристалізація водного розчину  $\text{NaNO}_3$ . Визначити величину теплового потоку  $q$  (та супутні величини), який відводиться з теплообмінної поверхні площею  $S = 1,3 \text{ м}^2$  при охолодженні розчину від  $t_1 = 93 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ , який вміщує  $m_1 = 16,2$  моль  $\text{NaNO}_3$  на  $V = 1000$  г води, з урахуванням випаровування  $k = 4\%$  вихідної кількості розчину. Концентрація насиченого розчину при  $41 \text{ }^\circ\text{C}$  складає

$m_2 = 12,6$  моль на  $V = 1000$  г води. Маса  $NaNO_3$   $\mu = 8,52$  кг/моль; питома теплота кристалізації  $q_n = 2,11 \cdot 10^5$  Дж/моль; питома теплоємність твердої солі  $C_p = 2472$  Дж/(кг·К); питома теплота пароутворення води  $r = 2,345 \cdot 10^5$  Дж/кг;  $\chi_{np}=1$ . Продуктивність кристалізатора по розчину  $G = (4200; 4500; 4720; 5000; 5300; 5600; 5900; 6000; 6500; 7000)$  кг/год. Формули:

$$G_{np} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{np}}; \quad W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{np}q_n \frac{1}{S} - \frac{W r}{S}; \quad \chi_1 = \frac{m_1 \mu}{V + m_1 \mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2 \mu}{V + m_2 \mu}.$$

Протаблювати також залежність кількості кристалів  $G_{np}$  від продуктивності  $G$  при  $G = (4 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3)$  кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.14. У насадочному адсорбері відбувається поглинання двооксиду сірки з інертного газу під атмосферним тиском. Адсорбер наповнений адсорбентом, для якого  $G = 48$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $V_{ce} = 0,55$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Визначити коефіцієнт масопередачі  $\beta$  та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер  $W = (0,06; 0,1; 0,12; 0,14; 0,17; 0,19; 0,21; 0,24; 0,25)$  м/с. Газова фаза має наступні властивості:  $\rho = 1,12$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,172$  Па·с;  $D = 11,47 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{ce} \frac{1}{G}; \quad Nu = 0,407 Re^{0,655} Pr^{0,33}; \quad Pr = \frac{\mu}{\rho D}; \quad Re = 4 \frac{W \rho}{G \mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови  $W = 0,2$  м/с, якщо  $G$  змінюється від 40 до 66,5 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, з кроком 0,1 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

4.15. Визначити діаметр ректифікаційної колони  $D$ , м, з ковпачковими тарілками, відстань між якими  $H = 320$  мм, якщо густина пари  $\rho_0 = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>, тиск  $p_0 = 1,04$  кг/см<sup>2</sup>, густина рідини  $\rho_p = 420$  кг/м<sup>3</sup>, абсолютний тиск у колоні

складає  $p = 1,3 \text{ кг/см}^2$ , середня температура  $T = 235 \text{ К}$ . Крізь колонну прокачується  $l_0 = 1200; 1300; 1420,8; 1600; 1700; 1820; 1940; 2000; 2150,8; 2300; 2500; 3000; 3400; 3620; 3800 \text{ м}^3/\text{год}$  пари. Розрахувати також залежність  $D = f(p)$  при  $p = 0,1 \dots 2 \text{ м}^3/\text{год}$  з кроком  $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$  при  $l_0 = 2500 \text{ м}^3/\text{год}$ . Формули :

$$\rho_n = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot p}{T \cdot p_0}; V = \frac{l_0 \cdot T \cdot p_0}{T_0 \cdot p \cdot 3600}; \omega = l \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}}; S = \frac{V}{\omega}; D = \sqrt{\frac{S}{0,785}}; l = 0,0315; T_0 = 237 \text{ К}.$$

4.16. Надано залежності:

$$G = \frac{V \cdot \tau \cdot l_0}{d_1 - d_2}, H = \frac{G}{\rho_{\text{нас}} \cdot 0,785 \cdot D^2}, D = \sqrt{\frac{V}{3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}},$$

за якими визначають кількість активного вугілля (кг), висоту його слою (м), і діаметр (м) адсорбера періодичної дії для очищення бензино-повітряної суміші від випаровувань бензину. Початкова концентрація бензину  $l_0 = 0,028 \text{ кг/м}^3$ , динамічна активність вугілля по бензину  $d_1 = 7,2 \text{ \% мас.}$ , кінцева активність після десорбції  $d_2 = 0,78 \text{ \% мас.}$ , насипна густина вугілля  $\rho_{\text{нас}} = 500 \text{ кг/м}^3$ . Тривалість десорбції, сушки та охолодження адсорбенту складає  $\tau = 1,33 \text{ год}$ . Виконати розрахунки для умов:

а) витрати суміші парів бензину і повітря  $V = 1020; 1100,8; 1200; 1320; 1500; 1600; 1720; 1800; 2000; 3000; 3500; 3700; 4000 \text{ м}^3/\text{год}$ . Швидкість бензино-повітряної суміші  $\omega = 0,28 \text{ м/с}$ .

б) Витрати  $V = 2500 \text{ м}^3/\text{г}$ ; швидкість  $\omega = (0,1 \dots 1,1) \text{ м/с}$  з кроком  $0,05 \text{ м/с}$ .

4.17. Термокамера має стінку товщиною  $\delta = 0,1 \text{ м}$  теплопровідністю матеріалу стінки  $\lambda = 3,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ . Температура в камері  $t_{\text{в}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , ззовні термокамери  $t_{\text{н}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  Коефіцієнт тепловіддачі від термокамери в навколишнє середовище  $\alpha_{\text{н}} = 38 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , у середині термокамери  $\alpha_{\text{в}}$  може приймати наступні значення:  $100; 200; 220; 300; 355; 500; 100, 1035; 1200, 1230; 1330;$

1400; 1455; 1470; 1500; 2200 Вт/(м<sup>2</sup> К). Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, теплового потоку тощо від коефіцієнта  $\alpha_g$ . Формули:

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_g}; \quad t_2 = t_H + \frac{q}{\alpha_H}; \quad q = \frac{t_g - t_H}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}}.$$

Виконати розрахунки також за умов  $\alpha_g = 660$  Вт/(м<sup>2</sup> К),  $\delta = (0,02 \dots 0,3)$  м з кроком 0,01 м.

4.18. Кришка апарата радіусом  $a = 0,33$  м та товщиною  $k = 0,02$  м знаходиться під дією тиску  $p = 0,15$  МПа. Визначити напруження  $N_r$ ,  $N_\tau$ , а також прогин  $I$ , якщо вона зроблена з сталі ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,31$ ). Розрахунок виконати з кроком по радіусу  $\Delta r = 0,005$  м, а також в точках на відстані  $r = (0,001; 0,006; 0,011; 0,018; 0,024; 0,028)$  м. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]; \quad N_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$I = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3; \quad R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.19. Надані формули для розрахунку напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\tau$  та переміщень  $Y$  у сталевому балоні:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}; \quad \sigma_\tau = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$Y = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Розміри балону:  $r_1 = 0,21$  м,  $r_2 = 0,44$  м. Тиск у балоні  $p_1 = 162$  МПа, тиск ззовні  $p_2 = 32$  МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для сталі:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ . Роздрукувати  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $Y$ ,  $R$  з кроком по радіусу  $\Delta R = 0,02$  м.

Визначити окремо  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $Y$ , при  $R = (0,211; 0,217; 0,388; 0,411; 0,415; 0,418; 0,433)$  м.

4.20. Визначити зміщення серединної лінії стінки сталеві труби  $r_{вн} = 0,2$  м,  $r_{зов} = 0,32$  м та супутні величини. Коефіцієнт Пуассона сталі  $\mu = 0,3$ ; модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $n = 2$ . Розрахункова формула:

$$U = \frac{1 - \mu}{E} \frac{r_{вн}^n P_{вн} - r_{зов}^n P_{зов}}{r_{зов}^n - r_{вн}^n} r_{сер} + \frac{1 + \mu}{E} \frac{r_{вн}^n r_{зов}^n (P_{зов} - P_{вн})}{(r_{зов}^n - r_{вн}^n) r_{сер}}, \quad \text{де } r_{сер} = \frac{r_{вн} + r_{зов}}{2}.$$

Розрахунок виконати для двох випадків:

а) Навантаження тиском  $P_{вн} = 123$  МПа,  $P_{зов} = (1 \dots 23,3)$  МПа з кроком розрахунку  $0,01$  МПа.

б) Навантаження тиском  $P_{вн} = (123; 122,1; 116; 111; 100,6; 89; 80; 77; 65; 53; 45; 41; 34; 28,2)$  МПа;  $P_{зов} = 28$  МПа.

4.21. Для ребра пластинчатого теплообмінника, яке знаходиться у повздовжньому потоці турбулентного повітря швидкістю  $V = 63$  м/с визначити значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і розрахувати товщину прикордонного слою  $\delta$ : а) для координат  $x$  від  $0,04$  м до  $1,2$  м з кроком  $0,01$  м; б) для координат  $x$ , що приймають значення (м):  $0,045; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0$ .

Формули та фізичні константи:

$$\delta = 0.37 \cdot x \cdot \text{Re}^{-0.2}; \quad \text{Nu} = 2.55 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0.8}; \quad \alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{x}; \quad \text{Re} = \frac{V}{\nu};$$

$$\nu = 14,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \lambda = 2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

4.22. Визначити напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_T$  та переміщення  $u$  у товстостінному циліндрі  $r_1 = 0,16$  м з отвором  $r_2 = 0,29$  м під дією внутрішнього  $p_1 = 150$  МПа та зовнішнього тиску  $p_2 = 14$  МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалу циліндра:  $\mu = 0,28$ ;  $E = 2,8 \cdot 10^4$  МПа; Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}; \quad \sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ ,  $R$  з кроком по радіусу  $\Delta R = \begin{cases} 0,01 & \text{якщо } r < R < 0,6 \\ 0,02 & \text{якщо } 0,6 \leq R \leq r_2 \end{cases}$ .

Визначити окремо  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ , при  $R = (0,134; 0,137; 0,142; 0,167; 0,184; 0,201; 0,283)$  м.

4.23. Термокамера має піношамотні стінки, товщиною  $\delta = 0,28$  м. Температура внутрішньої поверхні стінок  $t_{c1} = 1050$  °С, зовнішньої  $t_{c2} = 70$  °С. Теплопровідність  $\lambda_0 = 0,88$  Вт/(м К). Визначити перепад температур  $\Delta T$ , температуру  $T^*$  стінки та супутні величини: а) на глибині  $x = (0; 0,05; 0,1; 0,13; 0,133; 0,15; 0,154; 0,18; 0,2; 0,23)$  м; б) на глибині  $x$  від 0,1 м до 0,27 м з кроком 0,01 м. Формули:

$$T = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2 \cdot g x}{\lambda_0 \cdot \beta} - \frac{1}{\beta}}; \quad g = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2}); \quad \lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta \cdot \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right);$$

$$T^* = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot x; \quad \beta = \frac{1}{273 + t_{c1}}; \quad \Delta T = T - T^*.$$

4.24. Кришка апарату діаметром  $D = 0,3$  м та товщиною  $k = 0,02$  м заходиться під дією тиску ацетилену  $p = 0,28$  МПа. Визначити напруження



$\delta_r, \delta_\tau$ , а також прогин кришки  $S$ , якщо вона зроблена з сталі ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,31$ ) з кроком 0,004 м по радіусу  $r$ , а також в точках:  $r = (0; 0,007; 0,011; 0,013; 0,019; 0,027; 0,029)$  м. Формули:

$$a = D/2; \quad \delta_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]; \quad \delta_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)]; \quad R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)};$$

$$S = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3.$$

4.25. З резервуару, з температурою  $T_0 = 380$  К та під тиском  $P_0 = 5$  МПа, через конфузорне сопло витікає кисень у середовище з тиском  $P$  від 1 МПа до 3,8 МПа. Фізичні константи:  $K = 1,4$ ;  $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\mu = 32$ . Визначити швидкість витікання кисню  $V$  в залежності від тиску середовища  $P$  з кроком зміни 0,2 МПа, а також при  $P = (1,1; 1,35; 1,66; 2,15; 2,73; 3,7)$  МПа. Формула:

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

4.26. Клінкерна піч має стінку товщиною  $\delta = 0,22$  м та теплопровідністю матеріалу стінки  $\lambda = 4,23$  Вт/(м К). Температура в печі  $t_g = 1330$  °С, температура ззовні  $t_n = 28$  °С. Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище ззовні печі  $\alpha_n = 31$  Вт/(м<sup>2</sup> К). Коефіцієнт тепловіддачі в середовище у середині печі може складати  $\alpha_g = (110; 115; 154; 165; 168; 173; 182; 201; 220; 233; 266; 278; 290; 320; 400; 630; 700; 770)$  Вт/(м<sup>2</sup> К).

Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, тепловий потік тощо від коефіцієнта  $\alpha_g$ . Формули:

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_B}; \quad t_2 = t_H + \frac{q}{\alpha_H}; \quad q = \frac{t_B - t_H}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}}.$$

Виконати розрахунки також за умов  $\alpha_B = 500 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ ,  $\delta = (0,03 \dots 0,6) \text{ м}$  з кроком  $0,02 \text{ м}$ .

4.27. Стінка термокамери для сушіння полікарбонату складається з двох шарів. Перший шар: товщина  $\delta_1 = 0,09 \text{ м}$ ; теплопровідність  $\lambda_1 = 0,93 \text{ Вт/(м К)}$ . Другий шар:  $\delta_2 = 0,22 \text{ м}$ ;  $\lambda_2 = 2,83 \text{ Вт/(м К)}$ . Температура у камері  $t_B = 155 \text{ }^\circ\text{C}$ , ззовні –  $t_{cep} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Визначити температуру  $t_1, t_2, t_3$  на поверхні стінки камери та між шарами в залежності від коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_B = (330; 312; 287; 250; 210; 177; 165; 150; 140; 132; 100; 96; 85; 74; 60; 55; 43; 35) \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ .

Врахувати  $\alpha_c = 320 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ . Розрахувати також залежність  $q = f(\alpha_B)$  для діапазону  $\alpha_B = (80 \dots 480) \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$  з кроком  $10 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Формули:

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_B}; \quad t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad t_3 = t_{cep} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad q = \frac{t_B - t_{cep}}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$

4.28. Визначити залежність товщини гідродинамічного шару рідини  $\delta$  на відстані  $x = (0,01; 0,022; 0,025; 0,16; 0,2; 0,26; 0,1; 0,41; 0,33; 0,38; 0,9; 0,62; 1,04; 0,75) \text{ м}$ , якщо рідина обтікає плоске ребро конструкції довжиною  $l = 1,8 \text{ м}$ .

Параметри рідини в потоці:  $\nu = 3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}; t_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}; \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; Pe = 0,703;$

$\lambda = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ . Також визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від

координати  $x$ , за умови  $x = (0,3 \dots l) \text{ м}$  з кроком  $5 \text{ см}$ . Формули:

$$\delta = \frac{4,64x}{\sqrt{\text{Re}}}; \quad \text{Re} = \frac{\nu x}{\nu}; \quad \alpha = \mu_u \frac{\lambda}{x}; \quad \mu_u = 0,335 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot Pe^{\frac{1}{3}}.$$

4.29. Подвійна термоізоляційна стінка виготовлена з двох шарів. Перший має товщину  $\delta_1$  і коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ , а другий –  $\delta_2 = 0,06$  м і  $\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ , відповідно. Температура однієї з сторін стінки  $t_{\text{зоп}} = 1220$  °С, з іншої –  $t_{\text{хол}} = 16$  °С. Коефіцієнти тепловіддачі від стінки  $\alpha_{\text{хол}} = 26$  Вт/(м К). Тепловий потік крізь стінку  $\Theta = 960$  Вт/м. Визначити температуру поверхонь стінок  $t_1, t_2, t_3$  в залежності від товщини слою  $\delta_1 = (0,12; 0,13; 0,282; 0,22; 0,2; 0,186; 0,152; 0,11; 0,093; 0,07; 0,062)$  м. Визначити також коефіцієнт  $\alpha_1$ , якщо  $\delta_1 = 0,05$  м, а  $\delta_2 = (0,08...0,001)$  змінюється з кроком 0,001 м. Формули:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta}; \quad t_1 = t_{\text{зоп}} - \frac{\Theta}{\alpha_1}; \quad t_3 = t_2 - \Theta \frac{\lambda_2}{\delta_2}; \quad t_2 = t_1 - \Theta \frac{\lambda_1}{\delta_1};$$

$$\beta = \frac{t_{\text{зоп}} - t_{\text{хол}}}{\Theta} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}.$$

4.30. До каналу охолодження валка каландру подається вода зі швидкістю  $g = 0,18$  м/с. Температура стінок каналу  $t_c = 58$  °С. Довжина каналу  $l = 1,6$  м. Температура води на вході  $t_{\text{вх}} = 9$  °С, на виході  $t_{\text{вих}} = 33$  °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , якщо діаметр каналу  $d = (0,002; 0,003; 0,006; 0,01; 0,011; 0,015; 0,012; 0,021; 0,025; 0,03)$  м, а також величину теплового потоку  $Q$  в залежності від діаметру  $d$ , якщо діапазон його зміни складає від 0,005 м до 0,025 м з кроком 0,0005 м. Прийняти наступні значення фізичних коефіцієнтів:  $\nu_{\text{жс}} = 1,17 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $C_p = 4,12 \cdot 10^{-3}$  Дж/(кг·К);  $\lambda_{\text{жс}} = 0,73$  Вт/(м·К);  $\rho_{\text{жс}} = 998,65$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{жс}} = 1150 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\mu_c = 550,6 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Формули:

$$G = \rho_{\text{жс}} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad \text{Re} = \frac{gd}{\nu_{\text{жс}}}; \quad Q = \alpha [t_c - 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вих}})] \pi d l; \quad \alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_{\text{жс}}}{d}; \quad \text{Pe} \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{\text{жс}}};$$

$$Nu = 1,55 \left( Pe \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon; \quad \varepsilon = 0,6 \left( \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right).$$

4.31. У компресійній камері стискається газ об'ємом  $V$  від початкового тиску  $P_1 = 3$  кг/см<sup>2</sup> до тиску  $P_2 = 22$  кг/см<sup>2</sup>. Початкова температура газу  $t_1 = 5$  °С; КПД компресора  $\eta = 0,7$ . Теплофізичні константи:  $\gamma = 0,76$  кг/м<sup>3</sup>;  $k = 1,23$ ;  $R = 489,5$  Дж/(кг·К). Визначити потужність  $W$  (Вт), що споживається при стисканні, у залежності від об'єму газу  $V$ , при його зміні від 40 до 400 м<sup>3</sup>/год з кроком 10 м<sup>3</sup>/год, а також теоретичну роботу  $L$  (Дж/кг) для значень  $V = (12; 13; 15,2; 16,4; 18,3; 94; 20; 30; 43,6; 140; 288; 300)$  м<sup>3</sup>/год. Формули:

$$W = \frac{GL}{3600\eta 10^3}; \quad G = V\gamma;$$

$$L = \frac{k}{k-1} R t_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

4.32. Технологічний корпус теплоізований спіненим полімером товщиною  $\delta_2 = 0,07$  м, а саме стінка корпусу має товщину  $\delta_1 = 0,2$  м. Температура усередині корпусу  $T_t = 388$  К, навколишнього середовища ззовні –  $T_0 = 280$  К, коефіцієнт тепловіддачі у навколишнє середовище  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Визначити величину теплового потоку:

а) при наявності термоізоляції за формулою  $q = \frac{T_t - T_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}}$ , коефіцієнти

теплопровідності:  $\lambda_1 = 12$  Вт/(м·К);  $\lambda_2 = (0,05 \dots 9)$  Вт/(м·К) з кроком 0,05 Вт/(м·К);

б) у відсутності термоізоляції за формулою  $q = \frac{T_t - T_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha}}$ , коефіцієнт

теплопровідності  $\lambda_1 = (21; 18; 19; 17; 5; 3; 1,6; 1,1; 0,6)$  Вт/(м·К).

Визначити температуру на зовнішній поверхні стінки  $T_{\text{хол}}$  і температуру на границі шарів корпусу  $T_{\text{гран.}}$  за умов варіанта а). Формули:

$$T_{\text{гран.}} = T_t - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad T_{\text{хол.}} = T_0 + \frac{q}{\alpha}.$$

4.33. Визначити величину теплового потоку  $q$  у процесі кристалізації водного розчину  $\text{CaNO}_3$  (та супутні величини), якщо тепло відводиться з теплообмінної поверхні з площею  $S = 1,5 \text{ м}^2$  при охолодженні розчину від температури  $t_1 = 88 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$ , який вміщує  $m_1 = 14,9$  моль  $\text{CaNO}_3$  на кількість  $V = 965$  г води, з урахуванням випаровування  $k = 5\%$  вихідної кількості розчину. Концентрація насиченого розчину при  $39 \text{ }^\circ\text{C}$  складає  $m_2 = 12,8$  моль на  $V = 965$  г води. Маса  $\text{CaNO}_3$   $\mu = 8,5$  кг/моль; питома теплота кристалізації  $q_{\text{yd}} = 2,16 \cdot 10^5$  Дж/моль; питома теплоємність твердої солі складає  $C_p = 2470$  Дж/(кг·К);  $\chi_{\text{np}} = 1$ ; питома теплота пароутворення води складає  $r = 2,343 \cdot 10^5$  Дж/кг. Продуктивність процесу кристалізації по розчину  $G$  складає 4100; 4220; 4720; 5000; 5300; 5600; 5900; 6000; 6500; 6980 кг/год. Формули:

$$G_{\text{np}} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{\text{np}}}; \quad W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{\text{np}}q_{\text{yd}} \frac{1}{S} - \frac{W r}{S}; \quad \chi_1 = \frac{m_1 \mu}{V + m_1 \mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2 \mu}{V + m_2 \mu}.$$

Розрахувати також залежність кількості кристалів  $G_{\text{np}}$  від продуктивності  $G$  при  $G = (4 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3)$  кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.34. У насадочному адсорбері відбувається поглинання парів бензолу з інертного газу під атмосферним тиском. Адсорбер наповнений адсорбентом з показниками:  $G = 61 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $V_{\text{св}} = 0,58 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Визначити коефіцієнт масопередачі

$\beta$  та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер  $U$  складає 0,04; 0,1; 0,13; 0,14; 0,17; 0,177; 0,21; 0,234; 0,25 м/с. Газова фаза має наступні властивості:  $\rho = 1,11 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,17 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $D = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{cs} \frac{1}{G}; \quad Nu = 0,407 Re^{0,655} Pr^{0,33}; \quad Pr = \frac{\mu}{\rho D}; \quad Re = 4 \frac{U\rho}{G\mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови  $U = 0,2 \text{ м/с}$ , якщо  $G$  змінюється від  $28 \text{ м}^2/\text{м}^3$  до  $58,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , з кроком  $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

4.35. Ковпачкові тарілки встановлені в ректифікаційній колоні на відстані  $H = 320 \text{ мм}$  одна від одної. Визначити діаметр  $D$  (м) колоні, якщо густина пари  $\rho_0 = 1,27 \text{ кг/м}^3$ , тиск  $p_0 = 1,1 \text{ кг/см}^2$ , густина рідини  $\rho_p = 620 \text{ кг/м}^3$ , абсолютний тиску у колоні  $p = 1,33 \text{ кг/см}^2$ , середня температура  $T = 230 \text{ К}$ . Крізь колону прокачується  $U = 1250; 1330; 1420; 1660; 1770; 1820; 1990; 2100; 2150; 2330; 2500; 3070; 3400; 3660; 3810 \text{ м}^3/\text{год}$  пари. Розрахувати також залежність  $D = f(p)$  при  $p = 0,1 \dots 2,1 \text{ м}^3/\text{год}$  з кроком  $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$  при  $l_0 = 2800 \text{ м/год}$ .  
Формули :

$$\rho_n = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot p}{T \cdot p_0}; \quad \omega = l \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}}; \quad S = \frac{V}{\omega}; \quad D = \sqrt{\frac{S}{0,785}}; \quad l = 0,0315; \quad T_0 = 237 \text{ К};$$

$$V = \frac{U \cdot T \cdot p_0}{T_0 \cdot p \cdot 3600}.$$

4.36. У адсорбері періодичної дії очищується бензино-повітряна суміші від випаровувань бензину. Початкова концентрація бензину  $U = 0,028 \text{ кг/м}^3$ , динамічна активність вугілля по бензину  $d_1 = 7,4 \text{ \% мас.}$ , кінцева активність після десорбції  $d_2 = 0,77 \text{ \% мас.}$ , насипна густина вугілля  $\rho_{нас} = 530 \text{ кг/м}^3$ . Тривалість десорбції, сушки та охолодження адсорбенту складає  $\tau = 1,4 \text{ год}$ .

Кількість активного вугілля (кг):

$$G = \frac{V \cdot \tau \cdot U}{d_1 - d_2}.$$

Висота слою вугілля (м):

$$H = \frac{G}{\rho_{\text{нас}} \cdot 0,785 \cdot D^2}.$$

Діаметр адсорбера (м):

$$D = \sqrt{\frac{V}{3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}}.$$

Виконати розрахунки для умов:

а) Витрати суміші парів бензину і повітря  $V = (100; 1004,8; 1220; 1320; 1506; 1601; 1720; 1807; 2000; 3010; 3500; 3770; 4035)$  м<sup>3</sup>/год. Швидкість бензино-повітряної суміші  $\omega = 0,22$  м/с.

б) Витрати  $V = 2600$  м<sup>3</sup>/г; швидкість  $\omega = (0,1 \dots 1,3)$  м/г з кроком 0,05 м/с.

4.37. Теплопровідність стінки термокамери  $\lambda = 3,8$  Вт/(м К). Стінка має товщину  $\delta = 0,25$  м. Температура в камері  $t_{\text{в}} = 1000$  °С ззовні  $t_{\text{н}} = 18$  °С. Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище  $\alpha_{\text{н}} = 41$  Вт/(м<sup>2</sup> К), у середині термокамери  $\alpha_{\text{в}} = (80; 92; 96; 101; 108; 132; 78; 150; 118; 141; 360; 344; 625; 780; 1020; 1340; 1560)$  Вт/(м<sup>2</sup> К). Визначити залежність від коефіцієнта  $\alpha_{\text{в}}$  для температури стінки всередині, ззовні та для теплового потоку  $q$ , тощо. Формули:

$$t_1 = t_{\text{в}} - \frac{q}{\alpha_{\text{в}}}; \quad t_2 = t_{\text{н}} + \frac{q}{\alpha_{\text{н}}}; \quad q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}.$$

Виконати розрахунки також за умов  $\alpha_{\text{в}} = 655$  Вт/(м<sup>2</sup> К), та при зміні  $\delta$  від 0,05 м до 0,35 м з кроком 0,01 м.

4.38. Заслінка трубопроводу габаритним радіусом  $a = 0,36$  м та товщиною  $k = 0,03$  м знаходяться під дією тиску  $p = 0,13$  МПа. Визначити напруження

$T_r$ ,  $T_\tau$ , а також прогин заслінки  $Y$ , якщо вона зроблена з полімеру ( $E = 2,3 \cdot 10^3$  МПа,  $\mu = 0,22$ ). Розрахунок виконати з кроком  $\Delta r = 0,005$  м по радіусу  $r$  від нуля до габаритного радіуса  $a$ , а також в точках:  $r = (0,001; 0,003; 0,011; 0,018; 0,023; 0,027; 0,206)$  м. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)]; \quad N_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)]; \quad R = \frac{Ek^3}{12(1-\mu)};$$

$$Y = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3.$$

4.39. Надані формули для розрахунку напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_T$  та переміщення  $u$  у сталевому корпусі екструдера:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}; \quad \sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Розміри корпусу:  $r_1 = 0,045$  м,  $r_2 = 0,3$  м. Тиск у корпусі  $p_1 = 50$  МПа, та ззовні  $p_2 = 3$  МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для сталі:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ . Роздрукувати  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ ,  $R$  з кроком по радіусу  $\Delta R = 0,01$  м. Визначити окремо  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ , при  $R = (0,211; 0,217; 0,046; 0,048; 0,049; 0,243; 0,254; 0,258)$  м.

4.40. Визначити зміщення серединної лінії стінки сталевий труби  $r_{вн} = 0,3$  м,  $r_{зов} = 0,35$  м та супутні величини. Коефіцієнт Пуассона сталі  $\mu = 0,3$ ; модуль пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $n=2$ . Розрахункова формула:

$$U = \frac{1-\mu}{E} \frac{r_{вн}^n P_{вн} - r_{зов}^n P_{зов}}{r_{зов}^n - r_{вн}^n} r_{сер} + \frac{1+\mu}{E} \frac{r_{вн}^n r_{зов}^n (P_{зов} - P_{вн})}{(r_{зов}^n - r_{вн}^n) r_{сер}}, \quad \text{де } r_{сер} = \frac{r_{вн} + r_{зов}}{2}.$$



Розрахунок виконати для двох випадків:

- 1) Навантаження тиском  $P_{вн} = 128$  МПа,  $P_{зов} = (1...12)$  МПа з кроком зміни 0,01 МПа.
- 2) Навантаження тиском  $P_{вн} = (123; 122,1; 116; 111; 100; 89; 80; 77; 65; 53; 45; 41; 34; 28)$  МПа;  $P_{зов} = 28$  МПа.

4.41. У процесі кристалізації тепло відводиться з теплообмінної поверхні площею  $S = 1,8$  м<sup>2</sup>. Визначити величину теплового потоку  $q$  (та супутні величини), якщо при охолодженні розчину від температури  $t_1 = 78$  °С до температури  $t_2 = 29$  °С, Кількість речовини  $m_1 = 14,9$  моль на кількість води  $V = 950$  г. Має місце випаровування  $k = 3,5\%$  вихідної кількості розчину. Концентрація насиченого розчину при 29 °С складає  $m_2 = 12,8$  моль на  $V = 950$  г води. Маса речовини  $\mu = 8,2$  кг/моль; питома теплота кристалізації складає  $q_{yd} = 2,2 \cdot 10^5$  Дж/моль;  $\chi_{np} = 1$ ; питома теплоємність твердої фази складає  $C_p = 2330$  Дж/(кг·К); питома теплота пароутворення води  $r = 2,343 \cdot 10^5$  Дж/кг. Продуктивність процесу кристалізації по розчину  $G$  складає 4000; 4120; 4420; 5010; 5310; 5600; 5800; 6020; 6500; 6900 кг/год. Формули:

$$G_{np} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{np}}; \quad W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{np}q_{yd} \frac{1}{S} - \frac{Wr}{S}; \quad \chi_1 = \frac{m_1\mu}{V + m_1\mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2\mu}{V + m_2\mu}.$$

Розрахувати також залежність кількості кристалів  $G_{np}$  від продуктивності  $G$  при  $G = (3 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3)$  кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.42. До каналу барботеру шнеку екструдера подається вода зі швидкістю  $g = 0,12$  м/с. Температура стінок каналу  $t_c = 55$  °С. Довжина каналу  $l = 1,3$  м. Температура води на вході  $t_{вх} = 10$  °С, на виході  $t_{вих} = 35$  °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , якщо діаметр каналу  $d = (0,001; 0,002; 0,0035; 0,01;$

0,012; 0,014; 0,0125; 0,021; 0,023; 0,0275) м, а також величину теплового потоку  $Q$  в залежності від діаметру  $d$ , якщо діапазон його зміни складає від 0,0025 м до 0,025 м з кроком 0,0005 м. Прийняти наступні значення фізичних коефіцієнтів:  $\nu_{жс} = 1,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $C_p = 4,1 \cdot 10^{-3}$  Дж/(кг·К);  $\lambda_{жс} = 0,71$  Вт/(м·К);  $\rho_{жс} = 999$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{жс} = 1100 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\mu_c = 555 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Формули:

$$G = \rho_{жс} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad Re = \frac{gd}{\nu_{жс}}; \quad Q = \alpha [\{t_c - 0,5(t_{вх} + t_{вих})\}] \pi d l; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad Pe \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{жс}};$$

$$Nu = 1,55 \left( Pe \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon; \quad \varepsilon = 0,6 \left( \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right).$$

4.43. Визначити напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_T$  та переміщення  $u$  у стінці гідроциліндру  $r_1 = 0,4$  м з отвором  $r_2 = 0,6$  м під дією внутрішнього тиску  $p_1 = 110$  МПа та зовнішнього тиску  $p_2 = 12$  МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалу циліндра:  $\mu = 0,3$ ;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}; \quad \sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ ,  $R$  з кроком по радіусу  $\Delta R = \begin{cases} 0,01 & \text{якщо } r < R < 0,5 \\ 0,02 & \text{якщо } 0,5 \leq R \leq r_2 \end{cases}$ .

Визначити окремо  $\sigma_T$ ,  $\sigma_r$ ,  $u$ , при  $R = (0,41; 0,421; 0,442; 0,453; 0,467; 0,478; 0,503)$  м.

4.44. Переборка у апараті радіусом  $a = 0,5$  м та товщиною  $k = 0,025$  м знаходиться під дією тиску  $p = 0,1$  МПа. Визначити напруження  $N_r$ ,  $N_t$ , а також прогин переборки  $I$ , якщо вона зроблена з полімеру ( $E = 2,6 \cdot 10^3$  МПа,

$\mu = 0,21$ ). Розрахунок виконати з кроком по радіусу  $\Delta r = 0,002$  м, а також в точках:  
 $r = (0,0012; 0,0065; 0,0112; 0,0183; 0,0246; 0,0288; 0,1256)$  м. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot P}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]; \quad N_\tau = \frac{6 \cdot P}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$I = \frac{P}{64R} (a^2 - r^2)^3; \quad R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.45. Адсорбер для очистки газів наповнений адсорбентом, для якого  $G = 52 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $V_{cs} = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Визначити коефіцієнт масопередачі  $\beta$  та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер  $W = (0,04; 0,12; 0,16; 0,14; 0,175; 0,192; 0,221; 0,245; 0,258) \text{ м/с}$ . Газова фаза має наступні властивості:  $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,17 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $D = 11,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{cs} \frac{1}{G}; \quad Nu = 0,407 Re^{0,655} Pr^{0,33}; \quad Pr = \frac{\mu}{\rho D}; \quad Re = 4 \frac{W\rho}{G\mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови  $W = 0,23 \text{ м/с}$ , якщо  $G$  змінюється від 32 до  $63,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , з кроком  $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

## 5. Робота з інтегрованим середовищем розробки додатків

Засобами MSDev (FPS 4) обчислити залежність  $y=f(x)$  отримати 200...300 значень. Розробити таблицю ідентифікаторів і блок-схему алгоритму, побудувати діаграми.

$$5.1. \quad y = 18,6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{c}{6qk^c}; \quad k = 1,2; \quad c = 2,2; \quad q = 6,54; \quad x = 0..2\pi$$

$$5.2. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3,12c}{G^c}; \quad c = 0,12; \quad G = 124; \quad q = 7,3; \quad x = 0..2\pi$$

$$5.3. \quad y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3) + \cos(x - 2\pi/3)}}{12,2qG^c} + 12,1; x = 0...2\pi; G = 118,1; c = 0,33; q = 2,11$$

$$5.4. \quad y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G-3)} + 11,7; x = 0...2\pi; G = 76,2; c = 11,2; q = 0,23$$

$$5.5. \quad y = \frac{2,16 \sin(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4; x = 0...2\pi; c = 0,12; G = 124,4; q = 1,12$$

$$5.6. \quad y = \frac{\sqrt{\pi G} + \cos(x - 2\pi/3)}{15,6qG^{2c}} + 13,2; x = 0...2\pi; G = 121,3; c = 0,25; q = 0,93$$

$$5.7. \quad y = tg(x - 0,01) + \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{qc} + 13,2G; x = 0...2\pi/4; G = 11,1; c = 17,3; q = 17,5$$

$$5.8. \quad y = arctg(x - 0,11) + \frac{\sqrt{30G - 6,2}}{qc}; x = 0...1; G = 1,6; c = 12,7; q = 0,58$$

$$5.9. \quad y = \lg G + \frac{tg(x + 0,1)}{qc}; x = 0...2\pi/3; G = 18,7; c = 12,2; q = 0,88$$

$$5.10. \quad y = \frac{18,7tg(x - 0,11)}{13,5cqG} - 12,7; x = 0...2\pi/4; c = 0,3; G = 18,7; q = 0,94$$

$$5.11. \quad y = \frac{\sin(\pi x - 3,3)}{18,1Gq} - \sqrt{12G + k}; k = 16,7; G = 1,13; q = 0,55; x = 0...2\pi$$

$$5.12. \quad y = 18,7 \frac{tg(x + 0,01)}{13,5cG^c q} - 2; x = 0...2\pi/8; c = 0,3; G = 18; q = 16,2$$

$$5.13. \quad y = tg(x - 0,012) + \frac{18,7 \sin(x - 2\pi/3)}{qcG}; x = 0...2\pi/8; G = 11,1; c = 17,3; q = 3,1$$

$$5.14. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0,16c; x = 0...2\pi; k = 0,25; G = 2\pi; c = 1,2; q = 6$$

$$5.15. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; x = 0...2\pi; c = 1,2; G = 124,2; q = 12,33$$

$$5.16. \quad y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G-3)} + 6,12q; x = 0...2\pi; G = 76,1; c = 10; q = 2,1$$

$$5.17. \quad y = 28,2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12,4; k = 18,2; c = 2,3; q = 1,33; x = 0...2\pi$$

$$5.18. \quad y = 26,8N \frac{\sin(\pi - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3; \quad x = 0 \dots 2\pi; N=18,2; q=16,2; k=1,6; c=3,1$$

$$5.19. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0,16c}{q^k * G} + 1; \quad q = 2,2; x = 0 \dots 2\pi; k = 2; G = 2\pi; c = 1,2$$

$$5.20. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4; \quad q = 7,1; x = 0 \dots 2\pi; c = 0,12; G = 124$$

$$5.21. \quad y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3)} + \sin(x - 2\pi/3)}{12,6qG^c} + 12,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; G = 118,1; c = 0,33; q = 1,1$$

$$5.22. \quad y = \frac{615\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G - 3)} + 12; \quad x = 0 \dots 2\pi; G = 76,2; c = 11; q = 2,2$$

$$5.23. \quad y = 18,6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{c}{6qk^c}; \quad k = 1,2; c = 2,2; q = 6,54; x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.24. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3,12c}{G^c}; \quad c = 0,12; G = 124; q = 7,3; x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.25. \quad y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3)} + \cos(x - 2\pi/3)}{12,2qG^c} + 12,1; \quad x = 0 \dots 2\pi; G = 118,1; c = 0,33; q = 2,11$$

$$5.26. \quad y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G - 3)} + 11,7; \quad x = 0 \dots 2\pi; G = 76,2; c = 11,2; q = 0,23$$

$$5.27. \quad y = \frac{2,16 \sin(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4; \quad x = 0 \dots 2\pi; c = 0,12; G = 124,4; q = 1,12$$

$$5.28. \quad y = \frac{\sqrt{\pi G} + \cos(x - 2\pi/3)}{15,6qG^{2c}} + 13,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; G = 121,3; c = 0,25; q = 0,93$$

$$5.29. \quad y = \operatorname{tg}(x - 0,01) + \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{qc} + 13,2G; \quad x = 0 \dots \pi/4; G = 11,1; c = 17,3; q = 17,5$$

$$5.30. \quad y = \operatorname{arctg}(x - 0,11) + \frac{\sqrt{30G - 6,2}}{qc}; \quad x = 0 \dots 1; G = 1,6; c = 12,7; q = 0,58$$

$$5.31. \quad y = \lg G + \frac{\operatorname{tg}(x + 0,1)}{qc}; \quad x = 0 \dots 2\pi/3; G = 18,7; c = 12,2; q = 0,88$$

$$5.32. \quad y = \frac{18,7 \operatorname{tg}(x - 0,11)}{13,5cqG} - 12,7; \quad x = 0 \dots \pi/4; c = 0,3; G = 18,7; q = 0,94$$

$$5.33. \quad y = \frac{\sin(\pi x - 3,3)}{18,1Gq} - \sqrt{12G + k}; k = 16,7; G = 1,13; q = 0,55; x = 0 \dots \pi$$

$$5.34. \quad y = 18,7 \frac{tg(x + 0,01)}{13,5cG^c q} - 2; x = 0 \dots \pi/8; c = 0,3; G = 18; q = 16,2$$

$$5.35. \quad y = tg(x - 0,012) + \frac{18,7 \sin(x - 2\pi/3)}{qcG}; x = 0 \dots \pi/8; G = 11,1; c = 17,3; q = 3,1$$

$$5.36. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0,16c; x = 0 \dots 2\pi; k = 0,25; G = 2\pi; c = 1,2; q = 6$$

$$5.37. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; x = 0 \dots 2\pi; c = 1,2; G = 124,2; q = 12,33$$

$$5.38. \quad y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G - 3)} + 6,12q; x = 0 \dots 2\pi; G = 76,1; c = 10; q = 2,1$$

$$5.39. \quad y = 28,2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12,4; k = 18,2; c = 2,3; q = 1,33; x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.40. \quad y = 26,8N \frac{\sin(\pi - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3; x = 0 \dots 2\pi; N = 18,2; q = 16,2; k = 1,6; c = 3,1$$

$$5.41. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0,16c}{q^k * G} + 1; q = 2,2; x = 0 \dots 2\pi; k = 2; G = 2\pi; c = 1,2$$

$$5.42. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4; q = 7,1; x = 0 \dots 2\pi; c = 0,12; G = 124$$

$$5.43. \quad y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3)} + \sin(x - 2\pi/3)}{12,6qG^c} + 12,2; x = 0 \dots 2\pi; G = 118,1; c = 0,33; q = 1,1$$

$$5.44. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; x = 0 \dots 2\pi; c = 1,2; G = 124,2; q = 12,33$$

$$5.45. \quad y = \frac{615 \sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G - 3)} + 12; x = 0 \dots 2\pi; G = 76,2; c = 11; q = 2,2$$

## 6. Створення програм з використанням програмних одиниць

За завданням розробити 4 програми:

- 1) з використанням тільки списків параметрів;
- 2) з використанням тільки спільних блоків пам'яті;
- 3) з використанням модулів;
- 4) з використанням файлового інтерфейсу для обміну даними між програмними одиницями.

В завданнях використовуються співвідношення:

$$x_1(2\alpha) = \frac{ch2\alpha + \sin 2\alpha}{sh2\alpha + \sin 2\alpha};$$

$$x_2(2\alpha) = \frac{ch2\alpha - \sin 2\alpha}{sh2\alpha + \sin 2\alpha};$$

$$x_3(2\alpha) = \frac{ch2\alpha - \cos 2\alpha}{sh2\alpha - \sin 2\alpha};$$

$$\alpha = \beta \ell / 2;$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)};$$

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x);$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x);$$

$$\theta(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x;$$

$$\xi(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x;$$

$$\beta = \left( \frac{3(1-\mu^2)}{a^2 h^2} \right)^{1/4}.$$

Коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ ; модуль пружності  $E=2 \cdot 10^5$  МПа.

6.1. Трубка теплообмінника  $l = 0,6$  м, радіуса  $a = 0,08$  м, товщиною  $h = 0,0015$  м знаходиться під дією рівномірно розподіленого вигинаючого моменту  $M_0 = 0,22$  Н·м та перерізуючої сили на торці  $Q_0 = 8$  Н. Визначити переміщення  $W_x$  на напруження  $\sigma_x$  зовнішньої поверхні трубки у координатах по довжині трубки  $x = (0 \dots l)$ . Для обчислення поділити довжину  $l$  на 40 частин. Формули:

$$W_x = -\frac{1}{2\beta^2 D} [\beta M_0 \varphi(\beta x) + Q_0 \theta(\beta x)]; \quad \sigma_x = \frac{6}{2\beta h^2} [2\beta M_0 \varphi(\beta x) + 2Q_0 \xi(\beta x)].$$

Обчислення  $W_x$ ,  $\sigma_x$  — виконати в підпрограмі;  $\varphi(\beta x)$ ,  $\theta(\beta x)$ ,  $\xi(\beta x)$  — обчислити в підпрограмах-функціях.

6.2. Трубчастий корпус реактора знаходиться під тиском внутрішнім реагенту  $P = 18$  МПа. Діаметр корпусу  $2a = 0,18$  м; довжина  $l = 1,75$  м, товщина стінки  $h = 0,00085$  м. На торцях корпусу виникає перерізуюча сила  $Q_0 = 16$  Н. Визначити переміщення  $U$  та вигинаючий момент  $M$  у 30 перерізах, рівномірно розміщених по довжині  $l$  (поточна координата  $x$ ). Формули:

$$U = -\frac{1}{2\beta^2 D} \left[ \frac{P}{2\beta} \varphi(\beta x) - \frac{P}{\beta} \theta(\beta x) \right]; \quad M = \frac{1}{2\beta} \left[ \frac{P}{\beta} \varphi(\beta x) - \frac{P}{\beta} \xi(\beta x) \right].$$

Змінні  $U$  та  $M$  – визначити в підпрограмі;  $\Psi$ ,  $\Theta$ ,  $\xi$ ,  $\varphi$  – оформити у вигляді функцій.

6.3. Коротка трубчаста обичайка довжиною  $l = 0,18$  м, зовнішнім діаметром  $2a = 0,16$  м, товщиною  $h = 0,018$  м знаходиться під дією зовнішнього тиску  $P = 12$  МПа. Визначити переміщення  $W$  стінок труби у 21 точці координати  $x$ , рівномірно розміщених по довжині  $l$ . Формули:

$$W = \frac{P \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right)}{\beta^3 D \left( \frac{h}{F} + \beta \left[ \chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right] \right)} \left( \frac{\sin \alpha \operatorname{sh} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha} \sin \beta \chi \operatorname{sh} \beta \chi + \frac{\cos \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\cos 2\alpha + \operatorname{ch} 2\alpha} \cos \beta \chi \operatorname{ch} \beta \chi \right);$$

$$F = \pi(a^2 - [a - h]^2).$$

$\chi_1, \chi_2, \chi_3$  – визначити як функції;  $W$  – в підпрограмі.

6.4. Циліндричний перехідний елемент трубопроводу для транспортування метану довжиною  $l = 0,38$  м, діаметром  $2a = 0,2$  м, товщиною стінки  $h = 0,005$  м знаходиться під дією внутрішнього тиску  $P = 2,2$  МПа. Визначити переміщення  $W$  та навантаження  $Q$  в залежності від координати  $x$  довжини труби  $l$ . Розрахунок виконати у 38 точках по  $l$ . Формули:



$$W = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4}(1-2c_1 \cdot sh-2c_2 \cdot ch); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha}[c_1(cs-cm)+c_2(cs+cm)];$$

$$sh = \sin \beta x \cdot sh \beta x; \quad ch = \cos \beta x \cdot ch \beta x; \quad cs = \cos \beta x \cdot sh \beta x; \quad cm = ch \beta x \cdot \sin \beta x;$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

Величини  $sh$ ,  $ch$ ,  $cs$ ,  $cm$  – визначити як функції. Для визначення  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  – скласти підпрограму.

6.5. Циліндрична труба знаходиться під дією зовнішнього надлишкового тиску  $P = 20$  МПа. Розміри труби: радіус  $a = 0,12$  м, товщина стінки  $h = 0,01$  м. Визначити переміщення  $W$ , момент  $M_x$  та навантаження  $Q_x$  в перерізах на відстані  $x = (0...l)$ , де  $l = 0,5$  м, з кроком  $\Delta x = 0,012$  м. Формули:

$$W = \frac{P \cdot e^{-\beta x}}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x); \quad M_x = -\frac{P}{4\beta^2} \psi(\beta x); \quad Q_x = \frac{P}{2} \theta(\beta x).$$

$\varphi(\beta x)$ ,  $\psi(\beta x)$ ,  $\theta(\beta x)$  – розробити у вигляді функцій; блок виводу значень оформити в підпрограмі.

6.6. Корпус випарної установки має вигляд сталльної циліндричної посудини діаметром  $2a = 0,82$  м, висотою  $l = 2,1$  м. Товщина стінки корпусу складає  $h = 0,011$  м. Густина соляного розчину в установці  $\rho = 1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити переміщення  $W$ , момент  $M$ , силу, що діє по колу  $N$ , які розвиваються на відстані  $x = (0...l)$  з кроком  $\Delta x = 0,025$  м в корпусі випарної установки. Формули:

$$W = -\frac{\rho \alpha^2 l}{Eh} \left[ 1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right]; \quad N = \rho \alpha l \left[ 1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right];$$

$$M = \frac{\rho \alpha l h}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[ \xi(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \theta(\beta x) \right].$$

$\theta$  та  $\xi$  визначити як функції.  $W$ ,  $N$ ,  $M$  – в підпрограмі.

6.7. Трубопровід діаметром  $2a = 0,8$  м підсилений сталевими кільцями з кроком  $l = 0,18$  м. Стінка трубопроводу – стальна, товщиною  $h = 0,0038$  м. По трубопроводу перекачується нітробензол під тиском  $P = 25$  МПа. Визначити силу  $N$ , діючу по колу трубопроводу між підсиленнями. Розрахунок виконати при  $x = (0 \dots l)$  з кроком  $0,005$  м. Формули:

$$N = -\frac{2}{\beta} \frac{P}{\frac{h}{F} + \beta \left[ \chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right]} \cdot \left( \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha} ck + \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha} sk \right);$$

$$ck = ch \beta x \cos \beta x; \quad sk = \sin \beta x sh \beta x; \quad F = \pi(a^2 - (a-h)^2)$$

Величини  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  визначити в підпрограмі, для визначення  $ck$ ,  $sk$  організувати підпрограми-функції.

6.8. Сушильна установка має циліндричну частину діаметром  $2a = 1,3$  м, довжину  $l = 1,8$  м та товщину стінки  $h = 0,0125$  м. Торці циліндричної частини шарнірно закріплені. Усередині установки розвивається тиск  $P = 2,5$  МПа. Визначити переміщення  $U$  та момент  $M$  по довжині  $x = (0 \dots l)$  циліндричної частини з кроком  $\Delta x = 0,03$  м. Формули:

$$U = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4} (1 - 2c_1 sh - 2c_2 ch); \quad M = \frac{Pl^2}{4\alpha^2} (c_1 ch - c_2 sh); \quad ch = \cos \beta x ch \beta x;$$

$$sh = \sin \beta x sh \beta x; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}.$$

Визначити в підпрограмі значення  $c_1$  та  $c_2$ , значення  $ch$  та  $sh$  визначити в підпрограмах-функціях.

6.9 Циліндрична цистерна довжиною  $l = 3$  м, радіусом  $a = 1,1$  м, товщиною стінки  $h = 0,01$  м навантажена силами та моментами, відповідно,  $Q_0 = 5,1 \cdot 10^3$  Н, та  $M_0 = 12,5$  Н·м, які рівномірно розподілені по торцях. Визначити

момент  $M_x$  в залежності від координати  $x = (0...l)$  по довжині  $l$  цистерни. Прийняти крок розрахунків  $\Delta x = 0,125$  м. Формули:

$$M_x = 2 \frac{c_1}{s_0} \left[ M_0 (c_2 - s_1) - \frac{Q_0}{\beta} s_2 \right] + 2 \frac{s_3}{s_0} \left[ M_0 (s_1 - s_3) + \frac{Q}{\beta} c_3 \right]; \quad c_1 = \cos \beta x sh \beta x; \quad c_2 = \cos \alpha sh \alpha; \quad \text{Для}$$

$$c_3 = \cos \alpha ch \alpha; \quad s_0 = \sin 2 \alpha sh 2 \alpha; \quad s_1 = \sin \alpha ch \alpha; \quad s_2 = \sin \alpha sh \alpha; \quad s_3 = \sin \beta x sh \beta x.$$

обчислення  $c_1, c_2, c_3$  – передбачити зовнішні функції,  $s_0, s_1, s_2, s_3$  – оформити у вигляді внутрішніх функцій.

6.10. Керамічні кільця довжиною  $l=0,6$  м, радіусом  $a=0,25$  м, товщиною  $h=0,006$  м знаходяться у скрубери-охолоджувачі під дією рівномірно розподіленої по торцям перерізуючої сили  $Q_0=8,2 \cdot 10^3$  Н. Модуль пружності  $E_k=6 \cdot 10^4$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu_k=0,2$ . Визначити переміщення  $U$  та момент  $M$ , виникаючі в кільці на відстані  $x$  від краю ( $x=0...l$ ). Розрахунок виконати з кроком  $\Delta x=0,025$  м. Формули:

$$U = \frac{Q_0}{\beta^3 D} (c_1 s_1 + c_{22}); \quad M = -\frac{2Q_0}{\beta} (c_1 s_2 - c_2 s_1); \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh \alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x.$$

Величини  $c_1, c_2, s_1, s_2$  визначити як функції,  $U$  та  $M$  – розрахувати в підпрограмі.

6.11. Визначити прогин  $U$  та зусилля  $Q$  в корпусі млина, виконаного у вигляді полого циліндра з шарнірно закріпленими краями, якщо всередині корпуса діє тиск маси  $P = 1,5$  МПа. Геометричні розміри: довжина  $l = 2,8$  м, радіус  $a = 0,8$  м, товщина стінки  $h = 0,0085$  м. Розрахунок виконати по довжині  $l$  з кроком  $\Delta x = 0,1$  м. Формули:

$$U = \frac{Pl^4}{64Da^4} (1 - 2c_1 s_1 - 2c_2 c_3); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha} [c_1 (c_4 - s_2) - c_2 (c_4 + s_2)]; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_3 = \cos \beta x ch \beta x; \quad c_4 = \cos \beta x sh \beta x; \quad s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = ch \beta x \sin \beta x.$$

Величини  $c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2$  – визначити як функції,  $U$  та  $Q$  – визначити в підпрограмі.

6.12. Циклонний апарат довжиною  $l = 1,2$  м, товщиною стінки  $h = 0,005$  м та діаметром  $2a = 0,5$  м знаходиться під дією внутрішнього тиску. Визначити прогин стінки  $W$  та момент  $M$ , що розвивається на відстані  $x = 0,8$  м від торця, якщо внутрішній тиск змінюється від  $P_{\min} = 0,1$  МПа до  $P_{\max} = 3,1$  МПа з кроком  $0,05$  МПа. Формули:

$$W = \frac{Pl^4}{64Da^4}(1 - 2c_1s_1 - 2c_2c_3); \quad M = \frac{Pl^2}{4a^2}(c_1c_3 + c_2s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

$s_1, c_3$  – див. завдання № 11. Для визначення  $M$  та  $W$  скласти підпрограму,  $c_1, c_2, c_3, s_1$  – визначити як підпрограми-функції.

6.13. Циліндричний адсорбер (довжина  $l = 1$  м, діаметр  $2a = 0,032$  м, товщина сталюї стінки  $h = 0,009$  м) рівномірно навантажений торцевим моментом  $M_0 = 12,6 \cdot 10^3$  Н·м. Визначити розподілення прогинів  $W$  та моментів  $M$  в корпусі адсорбера на відстані  $x = (0...l)$  від торцю з кроком  $\Delta x = 0,05$  м. Формули:

$$W = -\frac{M_0}{\beta^2 D}(c_1s_1 + c_2s_2); \quad M = 2M_0(c_1s_2 + c_2s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + \sin \alpha ch \alpha}{sh 2\alpha + \sin 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{sh 2\alpha + \sin 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x.$$

$c_1, c_2, s_1, s_2$  – визначити в підпрограмах-функціях,  $W$  та  $M$  – в підпрограмі.

6.14. Визначити переміщення  $U$  стінки корпусу циліндричної сталюї оболонки під дією розподілених по торцю перерізуючих сил  $Q_0 = 2,85 \cdot 10^3$  Н та моментів  $M_0 = 35$  Н·м. Довжина оболонки:  $l = 0,45$  м, діаметр  $2a = 0,032$  м,

товщина стінки  $h = 0,028$  м. Розрахунок виконати з кроком  $\Delta x = 0,001$  м по довжині  $x = (0 \dots l)$ . Формули:

$$U = \frac{1}{\beta^2 D} \{c_1 [Q_0 \beta s_1 - M_0 (s_2 + s_3)] + c_2 [Q_0 s_1 - M_0 (s_2 - s_4)]\}; \quad c_1 = \frac{\sin \beta x \operatorname{sh} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \beta x \operatorname{ch} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_2 = \cos \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_3 = \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha; \quad s_4 = \cos \alpha \operatorname{ch} \alpha.$$

$c_1, c_2$  – визначити у внутрішніх функціях,  $s_1, s_2, s_3, s_4$  – визначити в підпрограмах-функціях.

6.15. Посилюючи кільця розміщені з кроком  $l = 1$  м на сталій трубі діаметром  $2a = 0,22$  м та товщиною стінки  $h = 0,0042$  м. Визначити навантаження  $Q_x$ , виникаюче на координаті  $x$  тілу труби між посиленнями, тобто при  $x = (0 \dots l)$  за умови тиску  $P = 1,2$  МПа. Розрахунок виконати з кроком  $\Delta x = 0,02$  м. Формули:

$$Q_x = -2 \frac{P(c_1 s_1 - c_2 s_2)}{\frac{h}{F} + \beta \left[ \chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right]}; \quad F = \pi(2ah + h^2); \quad s_2 = \operatorname{sh} \beta x \cos \beta x + \sin \beta x \operatorname{ch} \beta x$$

$$c_1 = \frac{\sin \alpha \operatorname{sh} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x - \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

Значення  $Q_x$  визначити в підпрограмі, величини  $c_1, c_2, s_1, s_2$  – визначити в підпрограмах-функціях.

6.16. Визначити прогин  $U$  та навантаження  $Q$  у трубчастій вставці теплообмінного контуру, навантаженого розподіленим моментом  $M_0 = 11$  Н·м на торцях. Геометричні розміри вставки: довжина  $l = 1,2$  м, радіус  $a = 0,6$  м, товщина стінки  $h = 0,0082$  м. Прогин  $U$  та навантаження  $Q$  подати у вигляді табличної залежності від координати  $x$  по довжині  $l$  вставки. Крок розрахунків  $\Delta x = 0,05$  м. Формули:

$$U = -\frac{M_0}{\beta^2 D}(c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad Q = 2M_0 \beta [c_1(s_3 - s_4) - c_2(s_3 + s_4)]; \quad c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x; \quad s_3 = \cos \beta x sh \beta x; \quad s_4 = \sin \beta x ch \beta x.$$

Значення  $c_1$  та  $c_2$  визначити в підпрограмах-функціях, значення  $U$  та  $Q$  – в підпрограмах.

6.17. Труба довжиною  $l = 0,7$  м, радіусом  $a = 0,12$  м, товщиною стінки  $h = 0,002$  м знаходиться під дією рівномірно розподіленого вигинаючого моменту та перерізуючої сили на торці:  $M_0 = 0,25$  Н·м,  $Q_0 = 12$  Н. Визначити переміщення  $W_x$  на напруження  $N_x$  зовнішньої поверхні труби у координатах  $x = (0 \dots l)$ . Для обчислення поділити довжину  $l$  на 50 частин. Формули:

$$W_x = -\frac{1}{2\beta^2 D} [\beta M_0 \varphi(\beta x) + Q_0 \theta(\beta x)]; \quad N_x = \frac{6}{2\beta h^2} [2\beta M_0 \varphi(\beta x) + 2Q_0 \xi(\beta x)]$$

Обчислення  $W_x$ ,  $N_x$  виконати в основній програмі,  $\varphi(\beta x)$ ,  $\theta(\beta x)$ ,  $\xi(\beta x)$  обчислити в підпрограмах. Для виводу результатів розробити функцію.

6.18. Циліндричний подовжувач трубопроводу для транспортування етанолу довжиною  $l = 0,2$  м, діаметром  $2a = 0,12$  м, товщиною стінки  $h = 0,0035$  м знаходиться під дією внутрішнього тиску  $P = 3,2$  МПа. Визначити переміщення  $W$  та навантаження  $Q$  в залежності від координати  $x$  довжини труби  $l$ . Розрахунок виконати у 45 точках по довжині. Формули:

$$W = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4} (1 - 2c_1 \cdot sh - 2c_2 \cdot ch); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha} [c_1(cs - cm) + c_2(cs + cm)];$$

$$sh = \sin \beta x \cdot sh \beta x; \quad ch = \cos \beta x \cdot ch \beta x; \quad cs = \cos \beta x \cdot sh \beta x; \quad cm = ch \beta x \cdot \sin \beta x;$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

Величини  $sh$ ,  $ch$ ,  $cs$ ,  $ct$  – визначити як внутрішні функції. Для визначення  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  – скласти відповідні підпрограми.

6.19. Корпус сталевий синтез-колони має циліндричний вигляд діаметром  $2a = 1,1$  м, висотою  $l = 3,1$  м, товщиною стінки  $h = 0,031$  м. Густина розчину в установці  $\rho = 1,22 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити переміщення  $W$ , момент  $M$ , силу, діючу по колу,  $N$ , які розвиваються на відстані  $x = (0 \dots l)$  з кроком  $\Delta x = 0,02$  м в корпусі установки. Формули:

$$W = -\frac{\rho a^2 l}{Eh} \left[ 1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right]; \quad N = \rho a l \left[ 1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right];$$

$$M = \frac{\rho a l h}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[ \xi(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta l} \right) \theta(\beta x) \right].$$

$\theta$  та  $\xi$  визначити як внутрішні функції,  $W$ ,  $N$ ,  $M$  – в підпрограмах. Вивести результати за допомогою функції.

6.20. Автоклав має циліндричну частину діаметром  $2a = 1,25$  м, довжиною  $l = 1,45$  м, товщиною  $h = 0,015$  м. Торці циліндричної частини шарнірно закріплені. Усередині установки розвивається тиск  $P = 4,5$  МПа. Визначити переміщення  $U$  та момент  $M$  по довжині циліндричної частини з кроком  $\Delta x = 0,05$  м,  $x = (0 \dots l)$ . Формули:

$$U = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4} (1 - 2c_1 sh - 2c_2 ch); \quad M = \frac{Pl^2}{4\alpha^2} (c_1 ch - c_2 sh); \quad ch = \cos \beta x ch \beta x;$$

$$sh = \sin \beta x sh \beta x; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}.$$

Визначити в підпрограмі переміщення  $U$  та момент  $M$ , значення  $c_1$  та  $c_2$ , визначити во внутрішніх функціях, а значення  $ch$  та  $sh$  – визначити в підпрограмах-функціях.

6.21. Керамічні кільцеві опори довжиною  $l = 0,3$  м, радіусом  $a = 0,15$  м, товщиною  $h = 0,004$  м знаходяться під дією рівномірно розподіленої по торцям перерізуючої сили  $Q_0 = 6,4 \cdot 10^3$  Н. Модуль пружності  $E_k = 6 \cdot 10^4$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu_k = 0,2$ . Визначити переміщення  $U$  та момент  $M$ , які виникають відстані  $x$  від краю:  $x = (0 \dots l)$ . Розрахунок виконати з кроком  $\Delta x = 0,05$  м. Формули:

$$U = \frac{Q_0}{\beta^3 D} (c_1 s_1 + c_{22}); \quad M = -\frac{2Q_0}{\beta} (c_1 s_2 - c_2 s_1); \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh \alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x.$$

Величини  $c_1, c_2, s_1, s_2$  – визначити як функції,  $U$  та  $M$  – розрахувати в основній програмі, блок виводу результатів розробити як підпрограму.

6.22. Ресивер довжиною  $l = 1,4$  м, товщиною стінки  $h = 0,008$  м та діаметром  $2a = 0,55$  м знаходиться під дією внутрішнього тиску  $P$ . Визначити прогин стінки  $W$  та момент  $M$ , що розвивається на відстані  $x = 0,4$  м від торця, якщо внутрішній тиск змінюється від  $P_{\min} = 0,01$  МПа до  $P_{\max} = 2$  МПа з кроком  $0,01$  МПа. Формули:

$$W = \frac{Pl^4}{64Dl^4} (1 - 2c_1 s_1 - 2c_2 c_3); \quad M = \frac{Pl^4}{4\alpha^2} (c_1 c_3 + c_2 s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

$s_1, c_3$  – див. завдання № 11. Для визначення  $M$  та  $W$  скласти підпрограми-функції,  $c_1, c_2, c_3, s_1$  – визначити як внутрішні функції.

6.23. Визначити переміщення  $U$ , виникаюче в корпусі циліндричної сталеві оболонки під дією розподілених по торцю перерізуючих сил  $Q_0 = 1,35 \cdot 10^3$  Н та моментів  $M_0 = 62$  Н·м. Розміри оболонки: довжина  $l = 0,52$  м,



діаметр  $2a = 0,044$  м, товщина стінки  $h = 0,026$  м. Розрахунок виконати з кроком  $\Delta x = 0,005$  м по координаті  $x = (0 \dots l)$ . Формули:

$$U = \frac{1}{\beta^2 D} \{c_1 [Q_0 \beta s_1 - M_0 (s_2 + s_3)] + c_2 [Q_0 s_1 - M_0 (s_2 - s_4)]\}; \quad c_1 = \frac{\sin \beta x \operatorname{sh} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \beta x \operatorname{ch} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_2 = \cos \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_3 = \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha; \quad s_4 = \cos \alpha \operatorname{ch} \alpha.$$

$c_1, c_2$  – визначити у внутрішніх функціях,  $s_1, s_2, s_3, s_4$  – визначити в зовнішніх функціях. Для виводу результатів застосувати підпрограму.

6.24. Визначити прогин  $U$  та навантаження  $Q$  у трубчастій вставці реактору, навантаженого по торцях розподіленим моментом  $M_0 = 17,2$  Н·м. Геометричні розміри вставки: довжина  $l = 1,25$  м, радіус  $a = 0,6$  м, товщина стінки  $h = 0,0065$  м. Прогин  $U$  та навантаження  $Q$  подати у вигляді табличної залежності від координати  $x$  по довжині  $l$  вставки з кроком  $\Delta x = 0,05$  м. Формули:

$$U = -\frac{M_0}{\beta^2 D} (c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad Q = 2M_0 \beta [c_1 (s_3 - s_4) - c_2 (s_3 + s_4)]; \quad c_1 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha + \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha - \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x; \quad s_3 = \cos \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_4 = \sin \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

Значення  $c_1$  та  $c_2$  визначити в підпрограмах-функціях, значення  $U$  та  $Q$  – в підпрограмах. Значення  $s_1, s_2, s_3, s_4$  – визначити у внутрішніх функціях.

## 7. Розв'язання диференціальних моделей на базі звичайних диференціальних рівнянь

7.1. Згідно до завдання (табл. 1) скласти диференціальну модель, її дискретний аналог за методом Ейлера для визначення температури об'єкту  $T$  в залежності від часу  $t$  та отримати її розв'язання, якщо відомі:  $K$  – коефіцієнт швидкості теплопередачі;  $T_0$  – початкова температура об'єкту;  $T_{cp}(t)$  – закон зміни температури оточуючого середовища в часі,  $t_{max}$  – час спостереження.

7.2. Згідно до завдання (табл. 4.2) скласти диференціальну модель, її дискретний аналог за методом Рунге-Кутта для визначення кількості речовини  $C$ , одержуваної у будь-який момент часу  $t > 0$  реакції двох вихідних речовин  $A$  та  $B$ , кількістю (у початковий момент часу)  $a$  та  $b$ , відповідно.  $c_0$  – кількість речовини  $C$ , що одержане у будь-який час  $t_0$ . Врахувати, що з  $\alpha$  кількості речовини  $A$  і  $\beta$  кількості речовини  $B$  виходить  $\alpha + \beta = \chi$  речовини  $C$ . Отримати таблицю шуканих значень. Розрахунок провести при зменшенні кроку дискретизації. Відшукати граничне значення кроку для отримання стійкого рішення. Побудувати графіки шуканих величин та зробити висновки про збіжність отриманих розв'язань.

Таблиця 1. Завдання для визначення температури об'єкту

| №  | $T_{cp}(t)$               | $t_{max}$ | $T_o$ | $K$            |
|----|---------------------------|-----------|-------|----------------|
| 1  | $1,4+0,3t^2$              | 22        | 36    | 0,24/0,48/0,72 |
| 2  | $28-2t$                   | 10        | 40    | 0,25/0,38/0,8  |
| 3  | $3,2+2,1t$                | 14        | 28    | 0,1/0,3/0,66   |
| 4  | $2+1,8t$                  | 12        | 38    | 0,22/0,4/0,78  |
| 5  | $25-0,24t^2$              | 10        | 41    | 0,12/0,33/0,77 |
| 6  | $26,2-0,31t^2$            | 9         | 32    | 0,2/0,44/0,8   |
| 7  | $2+0,18t^2$               | 10        | 35    | 0,12/0,24/0,75 |
| 8  | $1,87+0,21t^2$            | 9         | 38    | 0,16/0,45/0,81 |
| 9  | $30,22-0,031t^3$          | 9,2       | 44    | 0,11/0,54/0,76 |
| 10 | $3,21+0,015t^3$           | 8,3       | 39,9  | 0,12/0,34/0,87 |
| 11 | $30-6(t+2)^{1/2}$         | 12        | 40,1  | 0,14/0,4/0,75  |
| 12 | $28,6-4t^{1/2}$           | 17        | 33,2  | 0,17/0,33/0,68 |
| 13 | $2,2+6,3t^{1/2}$          | 11        | 34,8  | 0,14/0,43/0,81 |
| 14 | $2,68+7,2(t+4)^{1/2}$     | 15,3      | 42    | 0,16/0,44/0,9  |
| 15 | $28,7-4,12(t+1,2)^{1/2}$  | 12,       | 34    | 0,14/0,39/0,87 |
| 16 | $1,4+0,3t^2$              | 23        | 34    | 0,28/0,4/0,78  |
| 17 | $28-2t$                   | 12        | 45    | 0,22/0,36/0,82 |
| 18 | $3,2+2,1t$                | 13        | 34    | 0,14/0,33/0,63 |
| 19 | $2+1,8t$                  | 11        | 44    | 0,21/0,41/0,71 |
| 20 | $25,7-0,22t^2$            | 7         | 22    | 0,14/0,32/0,75 |
| 21 | $26,9-0,36t^2$            | 2,5       | 52    | 0,21/0,4/0,81  |
| 22 | $2,1+0,17t^2$             | 7         | 44    | 0,13/0,25/0,76 |
| 23 | $1,87+0,241t^2$           | 5         | 17    | 0,17/0,46/0,84 |
| 24 | $30,2-0,0321t^3$          | 6         | 12    | 0,13/0,53/0,77 |
| 25 | $3,26+0,0115t^3$          | 7,3       | 77    | 0,15/0,32/0,84 |
| 26 | $30-6/13(t+2)^{1/2}$      | 12,5      | 51    | 0,13/0,41/0,76 |
| 27 | $27,6-7/6t^{1/2}$         | 17,8      | 40    | 0,17/0,32/0,69 |
| 28 | $2,23+7,3(t/2)^{1/2}$     | 11,6      | 12    | 0,14/0,43/0,81 |
| 29 | $2,8+7,1(3t+4)^{1/2}$     | 12,3      | 6     | 0,146/0,4/0,92 |
| 30 | $29,7-4,12t(2t+0,2)$      | 12,1      | 8     | 0,11/0,4/0,79  |
| 31 | $30,2-0,0321t^3$          | 5,6       | 12    | 0,12/0,55/0,99 |
| 32 | $3,26+0,0115t^3$          | 5,7       | 3     | 0,14/0,3/0,81  |
| 33 | $30-6t(t+2)/13$           | 18        | 55    | 0,12/0,4/0,75  |
| 34 | $27,6-7t^{1/2}/6$         | 15        | 45    | 0,13/0,3/0,72  |
| 35 | $2,23+7,3(t/2)^{1/2}$     | 13,6      | 5     | 0,1/0,3/0,84   |
| 36 | $2,8+7,1(3t+4)^{1/2}$     | 11,3      | 3     | 0,16/0,4/0,93  |
| 37 | $29,7-4,12(2t+0,2)^{1/2}$ | 10,1      | 0     | 0,12/0,3/0,9   |
| 38 | $31,2-0,0321t^3$          | 6,2       | 11    | 0,11/0,5/0,7   |
| 39 | $3,2+0,011t^2$            | 7,0       | 73    | 0,17/0,35/0,8  |
| 40 | $30,6-0,6(t+1,6)^{1/2}$   | 12,2      | 53    | 0,12/0,4/0,75  |

Таблиця 2. Завдання для визначення кількості речовини

| №  | Реакція в'яжучого в надлишку води $K(t)$ | Час спостереження | Речовина |         |        |       |
|----|--|-------------------|----------|---------|--------|-------|
|    |  |                   | $B$      |         | $C$    |       |
|    |  |                   | $b$      | $\beta$ | $\chi$ | $c_0$ |
| 1  | 248t                                     | 10                | 8        | 1       | 6      | 1     |
| 2  | 6exp(t)                                  | 1,2               | 10       | 1       | 6      | 2     |
| 3  | 3t <sup>2</sup> +t                       | 9,7               | 9        | 1       | 8      | 2     |
| 4  | 22,2t                                    | 12                | 6        | 1       | 5      | 1     |
| 5  | 2+exp(2t)                                | 1,2               | 12       | 1       | 8      | 2     |
| 6  | 12t+3,2                                  | 5                 | 7        | 1       | 6      | 1     |
| 7  | t <sup>2</sup> +t                        | 1,6               | 6        | 1       | 6      | 1     |
| 8  | 2t+11,2                                  | 7                 | 7        | 1       | 8      | 1     |
| 9  | 24t <sup>3</sup> +1                      | 1,3               | 11       | 1       | 8      | 2     |
| 10 | 17t+1,6                                  | 8,3               | 8        | 1       | 5      | 1     |
| 11 | 1,2t <sup>2</sup> +0,3t                  | 3,3               | 6        | 1       | 5      | 1     |
| 12 | 2,2exp(t)                                | 1,7               | 7        | 1       | 8      | 2     |
| 13 | 1,3exp(t)                                | 2,1               | 10       | 1       | 8      | 1     |
| 14 | 8t+4                                     | 6                 | 6        | 1       | 6      | 1     |
| 15 | 73,3-0,2t                                | 12                | 8        | 1       | 6      | 1     |
| 16 | 248+t                                    | 10                | 8        | 1       | 6      | 1     |
| 17 | 2exp(t)                                  | 1,2               | 10       | 1       | 6      | 2     |
| 18 | 3t+t <sup>2</sup>                        | 9,7               | 9        | 1       | 8      | 2     |
| 19 | 22,2t+6                                  | 12                | 6        | 1       | 5      | 1     |
| 20 | 2+exp(2,2t)                              | 1,2               | 12       | 1       | 8      | 2     |
| 21 | 12+3,2t                                  | 5                 | 7        | 1       | 6      | 1     |
| 22 | t <sup>2</sup> +0,8t                     | 1,6               | 6        | 1       | 6      | 1     |
| 23 | 2t+12                                    | 7                 | 7        | 1       | 8      | 1     |
| 24 | 2t <sup>2</sup> +t+1                     | 1,3               | 11       | 1       | 8      | 2     |
| 25 | 12t+1,3                                  | 8,3               | 8        | 1       | 5      | 1     |
| 26 | 1,1t <sup>2</sup> +0,25t                 | 3,3               | 6        | 1       | 5      | 1     |
| 27 | 2,7exp(t)                                | 1,7               | 7        | 1       | 8      | 2     |
| 28 | 1,8exp(t)                                | 2,1               | 10       | 1       | 8      | 1     |
| 29 | 4(t+1)                                   | 6                 | 6        | 1       | 6      | 1     |
| 30 | 63,2-0,12t                               | 12                | 8        | 1       | 6      | 1     |
| 31 | 2,4+exp(2,1t)                            | 1,2               | 12       | 1       | 8      | 2     |
| 32 | 11+2t                                    | 5                 | 7        | 1       | 6      | 1     |
| 33 | t <sup>2</sup> +0,8t                     | 1,5               | 6        | 1       | 6      | 1     |
| 34 | 2,6t+10                                  | 7                 | 7        | 1       | 8      | 1     |
| 35 | t <sup>2</sup> +t+3                      | 1,3               | 11       | 1       | 8      | 2     |
| 36 | 2t+13                                    | 8,3               | 8        | 1       | 5      | 1     |
| 37 | 1,6t <sup>2</sup> +0,2t                  | 3,3               | 6        | 1       | 5      | 1     |
| 38 | 2exp(1,6t)                               | 1,7               | 7        | 1       | 8      | 2     |
| 39 | 1,3exp(t)                                | 2,1               | 10       | 1       | 8      | 1     |
| 40 | 5(t+3)                                   | 6                 | 6        | 1       | 6      | 1     |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання завдань з лабораторних робіт та самостійної роботи студентів з кредитного модуля «Інженерні розрахунки на ПЕОМ – 1. Програмування»/ Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 86 с.
2. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 1. Програмування. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за спеціальністю 133 – ««Галузеве машинобудування»», спеціалізація – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів та виробів»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак, І. І. Івіцький – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 66 с.
3. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 2. Процедурне програмування. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання, які навчаються за спеціальністю 133 – ««Галузеве машинобудування»», спеціалізація – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів та виробів»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак, І. І. Івіцький. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 38 с.
4. Методичні вказівки до виконання завдань з лабораторних робіт та самостійної роботи студентів з кредитного модуля «Інженерні розрахунки на ПЕОМ - 2. Процедурне програмування і основи моделювання»/ Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 48 с.
5. Методичні вказівки до виконання завдань з комп'ютерного практикуму та самостійної роботи студентів з дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ – 1. Програмування», для студентів напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 86 с.

6. Інженерні розрахунки на персональних електронно-обчислювальних машинах – 2. Процедурне програмування і основи моделювання: Методичні вказівки до виконання завдань комп'ютерного практикуму та самостійної роботи студентів напрямів підготовки 6.050503 – Машинобудування, 6.050502 – Інженерна механіка / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 48 с.
7. Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. Основи інженерних розрахунків на ПЕОМ. Програмування алгоритмічною мовою ФОРТРАН. – К: Центр учбової літератури, 2016. – 185 с.
8. Методичні вказівки до виконання домашньої контрольної роботи для студентів заочної форми навчання з дисципліни «Інженерні розрахунки на персональних електронно-обчислювальних машинах», для студ. спец. «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» за напрямом підготовки 6.050503 «Машинобудування» / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 17 с.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

1. Методичні вказівки до виконання завдань з лабораторних робіт та самостійної роботи студентів з кредитного модуля «Інженерні розрахунки на ПЕОМ – 1. Програмування»/ Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 86 с.
2. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 1. Програмування. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування», спеціалізація – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів та виробів»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак, І. І. Івіцький – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 66 с.

3. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 2. Процедурне програмування. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання, які навчаються за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування», спеціалізація – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів та виробів»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак, І. І. Івіцький. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 38 с.
4. Методичні вказівки до виконання завдань з лабораторних робіт та самостійної роботи студентів з кредитного модуля «Інженерні розрахунки на ПЕОМ - 2. Процедурне програмування і основи моделювання»/ Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 48 с.
5. Методичні вказівки до виконання завдань з комп'ютерного практикуму та самостійної роботи студентів з дисципліни «Інженерні розрахунки на ПЕОМ – 1. Програмування», для студентів напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 86 с.
6. Інженерні розрахунки на персональних електронно-обчислювальних машинах – 2. Процедурне програмування і основи моделювання: Методичні вказівки до виконання завдань комп'ютерного практикуму та самостійної роботи студентів напрямів підготовки 6.050503 – Машинобудування, 6.050502 – Інженерна механіка / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 48 с.
7. Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. Основи інженерних розрахунків на ПЕОМ. Програмування алгоритмічною мовою ФОРТРАН. – К: Центр учбової літератури, 2016. – 185 с.
8. Методичні вказівки до виконання домашньої контрольної роботи для студентів заочної форми навчання з дисципліни «Інженерні розрахунки на персональних електронно-обчислювальних машинах», для студ. спец.

«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» за напрямом підготовки 6.050503 «Машинобудування» / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 17 с.

9. Ю. Рыжков. Программирование на Фортране PowerStation. Практическое руководство. – Санкт-Петербург: Корона принт, 1999г., 159с.

10. В. Э. Фигурнов. IBM PC для пользователя.-М.:, Финансы и статистика, 1992г., 283с.

11. З. С. Брич, Д.В. Капилевич, Н.А. Клевцова. Фортран 77 для ПЭВМ ЕС.- М.: Финансы и статистика, 1991, 285с.

12. Методические указания к лабораторным работам по курсу “Вычислительная математика и программирование. Раздел: решение ДУЧП МКР”.-Киев: КПИ, 1992г., 44с. Составители: Щербина В.Ю., Степаненко Б.Е., Насонкин Г.А.

13. Методические указания к лабораторным работам по курсу “Алгоритмические языки и программирование.”-Киев: КПИ, 1989г., 72с. Составители: Щербина В.Ю., Сахаров А. С., ЧубенкоА. И.

14. Методические указания по курсу “Математическое моделирование процессов и аппаратов отрасли.”-Киев:, КПИ, 1984г., 40с. Составитель: Федоткин И. М.

15. Бухтияров А. М., Малинкова Ю. П., Фролов Г. Д., Практикум по программированию на фортране. – М. Наука., 1988 г., 288 с.

16. MS-DOS 5.0 для пользователя. Герхард Франкен. – Киев: Торг.-изд. бюро ВНУ, 1992, 509 с.

17. Т. Уорд, Э. Бромхед. Фортран и искусство программирования персональных ЭВМ. – М.:, Радио и связь, 1993, 351с.

18. Я Белецки. Фортран 77. – М.: Высшая школа, 1991, 207 с.



19. Сідоров Д. Е., Щербіна В. Ю., Гондлях О. В., Гладкий В. М., Сокольський О. Л. Алгоритмічна мова Фортран в інженерних розрахунках. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму і самостійних робіт для студентів спеціальності 7.090220 – “Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів”. – Київ. ПД ІЕ НАН України. 2003, 37 с.

#### **Допоміжна література**

20. А. Е. Мудров. Численне методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП „Раско”, 1991 г., 271 с.
21. Бартенъев О.В. Современный Фортран. – М.: Диалог-МИФИ, 1988. – 397с.
22. Бартенъев О. В. Фортран для студентов Бартенъев О. В. Современный Фортран. – М.: Диалог-МИФИ, 1988. – 397 с.
23. Фортран 90. Международный стандарт. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 416 с.
24. Бартенъев О. В. Visual Fortran: новые возможности. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 301 с.
25. И. М. Федоткин, И. С. Гулий. Математическое моделирование технологических процессов методом аналогизации. Учебное пособие. – Винница, 2002, 377с.
26. И. М. Федоткин, И. С. Гулий. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификация. Учебное пособие. – Киев: Арктур-А. 1998 г., 415 с.
27. И. М. Федоткин. Математическое моделирование технологических процессов. Учебное пособие. – Киев, Вища школа. 1988 г., 415 с.
28. В. В. Штыков. FORTRAN & WIN32 API. – М.: ДиалогМИФИ, 2001, 302 с.
29. Ю. М. Баяковский и др. ГРАФАТОР. Графическое расширение Фортрана. – М.: Наука, 1985, 288 с.
30. М. Меткалф. Оптимизация в Фортране. – М.: Мир, 1985, 264 с.

## Інформаційні ресурси

Електронні ресурси з кредитного модуля:

- навчальна програма дисципліни – у електронному кампусі,
- робочу навчальну програму кредитного модуля – у електронному кампусі,
- методичні вказівки до виконання лабораторних робіт – у електронному кампусі та за адресою <http://cpsm.kpi.ua/mr.html>,
- методичні вказівки до виконання самостійної роботи – у електронному кампусі та за адресою <http://cpsm.kpi.ua/mr.html>.
- навчальний посібник – за адресою <http://cpsm.kpi.ua/mr.html>.

**Сідоров Дмитро Едуардович**  
**Казак Ірина Олександрівна**

**ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ.**  
**Завдання до самостійного розв’язання**

*навчальний посібник для підготовки бакалаврів, які навчаються за спеціальностями  
133 – Галузеве машинобудування, 131 – Прикладна механіка*

Комп’ютерна правка та верстка – *авторські*